



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NEJISTOTY MĚŘENÍ PRŮTOKU PÁRY**

STEAM FLOW MEASUREMENT ERROR ANALYSIS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Iveta Barabášová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Bobák, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Studentka: **Bc. Iveta Barabášová**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bobák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Nejistoty měření průtoku páry

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce by se měla věnovat praktické analýze chyb a nejistot měření průtoku páry pomocí standardní clonové měřicí tratě (sledováním diferenčního tlaku před a za clonou, absolutního tlaku před clonou a teploty za clonou).

Práce zapadá do výzkumného programu Centra nových technologií pro strojírenství (NETME Centre) při Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, konkrétně Laboratoře energeticky náročných procesů, v rámci které byl vybudován experimentální provoz průmyslové prádely jako model energeticky náročného procesu.

### Cíle diplomové práce:

Stručně zpracovat potřebný teoretický základ o chybách a nejistotách měření a o měření průtoku páry pomocí škrticí clony.

Podílet se na přípravě experimentálního měření průtoku (a kumulovaného průtoku) páry v Laboratoři energeticky náročných procesů, NETME Centre.

Zdokumentovat konfiguraci měřicí sestavy a průběh měření.

Zpracovat naměřená data a provést výpočet nejistoty výsledné hodnoty aktuálního a kumulovaného průtoku topné páry.

Diskutovat výsledky.

### Seznam doporučené literatury:

Program OrCal pro výpočet clon, dýz a Venturiho trubic dle normy ČSN ISO 5167. JSP - měření a regulace [online]. Jičín: JSP, s. r. o., 2016 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorii/software\\_ke\\_stazeni/program-orcal-pro-vypocet-clon-dyz-venturiho-trubic-dle-normy-csn-iso-5167-1.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/software_ke_stazeni/program-orcal-pro-vypocet-clon-dyz-venturiho-trubic-dle-normy-csn-iso-5167-1.html)

ČSN ISO 5167-2. Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu. Část 2. Clony. 1. vyd. Praha: ČNI, 2003.

NĚMEČEK, Pavel. Nejistoty měření. 1. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. Kvalita, quality, Qualität. ISBN 978-80-02-02089-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **Abstrakt**

Práce se zabývá analýzou nejistoty měření. Teoretické znalosti prezentované v úvodních kapitolách jsou aplikovány na nepřímé měření průtoku páry pomocí clony. Výpočet průtoku páry je založen na znalosti hodnoty tlakového rozdílu, hodnoty statického tlaku a hodnoty teploty. Data jsou dána experimentálním měřením v laboratoři. Nejistota hmotnostního průtoku je určena normalizovaným postupem (podle normy ČSN EN ISO 5167) a pro porovnání podrobnou analýzou chyb (podle normy ČSN ISO 5168). Celý číselný výpočet je realizován programovacím jazykem python v prostředí Spyder. Dalším výsledkem výpočtu je spotřeba páry pracího cyklu.

## **Summary**

The thesis deals with analysis of measurement uncertainty. The theoretical knowledge presented in opening chapters is applied on indirect steam flow measurement by orifice plate. Calculation of steam flow is based on knowledge of pressure difference value, static pressure value and temperature. The data are acquired by experimental measurement in laboratory. The mass flow rate uncertainty is determined by normalized procedure (according to standard ČSN EN ISO 5167) and by detailed error analysis (according to standard ČSN ISO 5168) for comparison. Whole numerical computation employs python programming language in Spyder environment. Other computation result is steam consumption of washing cycle.

## **Klíčová slova**

Nejistota, měření, nepřímé měření, průtok, pára, clona, ČSN EN ISO 5167, ČSN ISO 5168.

## **Keywords**

Uncertainty, measurement, indirect measurement, flow, steam, orifice plate, ČSN EN ISO 5167, ČSN ISO 5168.

BARABÁŠOVÁ, I. *Nejistoty měření průtoku páry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bobák, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s vedoucím práce, a že jsem veškeré literární i obrazové prameny správně a úplně citovala.

V Brně 26. května 2017

---

Bc. Iveta Barabášová



Děkuji panu Ing. Petru Bobákovi, Ph.D. za cenné rady při zpracování této diplomové práce.

Bc. Iveta Barabášová



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>1 Chyby a nejistoty měření</b>	<b>5</b>
1.1 Chyby měření . . . . .	5
1.2 Nejistoty měření . . . . .	7
1.2.1 Zákon šíření nejistot . . . . .	8
1.2.2 Praktické výpočty nejistoty měření . . . . .	10
<b>2 Metody měření průtoku</b>	<b>17</b>
2.1 Měřidla průtoku . . . . .	17
2.1.1 Objemová měřidla . . . . .	17
2.1.2 Rychlostní měřidla . . . . .	17
2.1.3 Průtokoměry využívající tlakovou ztrátu tekutiny . . . . .	18
2.1.4 Průtokoměry využívající dynamické působení tekutiny . . . . .	19
2.1.5 Ultrazvukové průtokoměry . . . . .	20
2.1.6 Magnetické indukční průtokoměry . . . . .	21
2.1.7 Hmotnostní průtokoměry . . . . .	21
2.2 Měření průtoku páry normalizovanou clonou . . . . .	22
2.2.1 Odvození vztahu pro objemový a hmotnostní průtok . . . . .	23
2.2.2 Tlaková ztráta . . . . .	25
2.2.3 Výpočet nejistoty průtoku dle ČSN EN ISO 5167 . . . . .	25
<b>3 Experimentální měření průtoku topné páry</b>	<b>27</b>
3.1 Příprava měření . . . . .	27
3.2 Průběh měření . . . . .	28
3.3 Naměřená data . . . . .	31
<b>4 Zpracování naměřených dat</b>	<b>33</b>
4.1 Výpočet průtoku páry . . . . .	33
4.2 Výpočet nejistoty měření průtoku páry . . . . .	36
4.2.1 Nejistota hmotnostního průtoku, způsob 1 . . . . .	38
4.2.2 Nejistota hmotnostního průtoku, způsob 2 . . . . .	38
4.2.3 Nejistota kumulovaného průtoku . . . . .	40
4.2.4 Nejistota průměrného hmotnostního průtoku . . . . .	41
4.3 Spotřeba topné páry dle dalších měřidel . . . . .	41
4.4 Tlaková ztráta . . . . .	42
<b>5 Diskuze výsledků</b>	<b>43</b>
<b>Závěr</b>	<b>47</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>51</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>55</b>





# Úvod

Nejistoty měření průtoku páry, už sám název práce stručně shrnuje její obsah. Cílem diplomové práce skutečně je seznámení s problematikou nejistot měření a aplikace těchto poznatků při experimentálním měření průtoku páry. Před bližším představením obsahu následujících stran by ale bylo vhodné zmínit důvod vzniku tohoto tématu.

Při zpracovávání bakalářské práce autorky s názvem *Prací proces a jeho nároky na energii a vodu* [1], bylo zapotřebí zjistit energetickou náročnost pracovního cyklu. Zpracováním dat z provedených měření však bylo zjištěno, že údaje o množství topné páry měřené clonovou tratí neměly velkou vypovídající hodnotu. Tento fakt měl samozřejmě dopad na výsledky srovnání náročnosti parního a elektrického ohřevu pracovní vody. Stal se však podnětem k bližšímu zaměření právě na měření průtoku páry škrtícím orgánem.

Úkolem se tak stalo provedení měření průtoku syté páry clonovou tratí. Tato experimentální část byla provedena v Laboratoři energeticky náročných procesů (LENP) v NETME Centre. Dalším bodem zadání se pak stalo zpracování výsledků měření. Oba tyto aspekty praktické části diplomové práce jsou popsány v kapitolách 3 a 4. Praktické části však předchází seznámení s problematikou tématu. Stručný náhled do této oblasti tak poskytují úvodní kapitoly 1 a 2. Kapitola 1 se zabývá chybami a nejistotami měření v obecné rovině. Následující kapitola 2 poté představuje metody měření průtoku tekutin a zejména potom měření pomocí normalizované clony.

Metod měření průtoku je opravdu celá řada, a i když je vodní pára velmi specifickým médiem, je její využití v procesním průmyslu velmi rozšířené. Základní vstupní komoditou velkého množství procesů je pára. Důvodem častého využití páry je její schopnost předat velký tepelný výkon při dopravě potrubím o relativně malém průřezu, oproti např. topné vodě. Topná pára tak proudí napříč zpracovatelskými a výrobními provozy i v rámci velké části starších systémů centrálního zásobování teplem. Oblast využití má širokou a stejně tak je rozsáhlá i nabídka snímačů určených k jejímu měření. Ne každá měřicí metoda je však vhodná pro danou problematiku. Správná volba metody a konkrétního snímače je mnohdy zásadní pro požadovanou přesnost výsledku. Měření průtoku s využitím tlakové difference je zavedený a spolehlivý způsob měření průtoku par. Platí zde ale určitá omezení, jejichž porušení může způsobit chybný výsledek. Podrobný pohled na měření snímači diferenčního tlaku umožňuje norma ČSN EN ISO 5167 - *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu* [2], na jejímž základě je postavena praktická část této práce.

Co více dodat k úvodu práce o nejistotách měření průtoku páry? Snad jen, že každý výsledek měření je v reálu zatížen chybou. Může se jednat o chybu způsobenou přístrojem, použitou metodou měření, výpočtem nebo jiným zdrojem. Pro práci s naměřenou hodnotou je však zapotřebí tyto chyby popsat a pokud je to možné i eliminovat. Normalizace postupů při vyhodnocování výsledků měření postupně nahradila pojem chyba tzv. nejistotou. Nejistota narozdíl od chyby neudává přímou odchylku naměřené a skutečné hodnoty, nýbrž stanovuje velikost určitého tolerančního pole s danou velikostí pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty. Korektní výsledek měření tak má sestávat, jak z výsledné hodnoty, tak z informace o nejistotě výsledku. Dodržování tohoto přístupu je možné vidět při kalibracích, přesných měřeních v elektrotechnice či v chemii. V průmyslové praxi tomu však stále není zvykem. Přitom samotná analýza zdrojů nejistoty může pomoci při optimalizaci použité metody měření.

Při pohledu na problematiku nejistot je ale jasné, že nejde o jednoduchou disciplínu. Velkou roli zde hraje předchozí zkušenost. Stručný náhled do oboru nejistot zpracovaný na následujících stranách tak zcela jistě neposkytuje přehled kompletního řešení. Jde spíše o úvod do dané problematiky.

# 1. Chyby a nejistoty měření

Při měření není ani při současném technickém pokroku žádná měřicí metoda ani měřicí přístroj 100% přesná. Výsledné hodnoty měření se vždy pohybují v určitém tolerančním poli okolo skutečné hodnoty. Velikost tohoto pole je závislá na mnoha faktorech, jak bude nastíněno v následujícím textu. Hlavním účelem této kapitoly je rozlišení pojmů chyba a nejistota měření a nastín praktického postupu výpočtu nejistoty měření.

## 1.1. Chyby měření

Jako chyba měření je označován rozdíl mezi skutečnou hodnotou a výsledkem měření. Skutečná hodnota veličiny vyjadřuje výsledek dokonalého měření. Tato hodnota je veskrze ideální a až na pár výjimek (např. teplota trojného bodu 273,16 K) ji nelze přesně určit. Proto se zavádí konvenčně pravá hodnota, která se odlišuje od skutečné hodnoty jen nepatrně a k jejímu stanovení je třeba vysokého počtu měření. V dalším textu jsou tyto dva pojmy ztotožněny. [3]

V případech chyby měření jsou rozlišovány chyby absolutní a relativní. Absolutní chyba měření  $\Delta_x$  je rozdílem skutečné hodnoty  $x_s$  a výsledku měření  $x_m$ . Poměr absolutní chyby měření a skutečné hodnoty je poté vyjádřen relativní chybou měření  $\delta_x$ .

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (1.1)$$

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (1.2)$$

Mezi původce chyb měření se řadí [3]:

- chyby přístroje - zahrnují nedokonalosti použitých měřidel vzniklé ve výrobě, montáži, při opotřebení nebo při stárnutí přístroje (změna metrologických charakteristik v čase),
- chyby v instalaci přístroje - mohou plynout z nevhodného uložení a nastavení měřidel, ze vzájemného ovlivňování měřidel zapojených paralelně nebo sériově atd.,
- chyby metody - vznikají v nedokonalosti nebo zjednodušení použité měřicí metody,
- chyby pozorování - jedná se spíše o chyby pozorovatele zapříčiněné jeho nedostatky a nesoustředěností,
- chyby výpočtové - projevují se při vyhodnocování výsledků měření v důsledku zjednodušených výpočtových vztahů, zjednodušení, zaokrouhlování, linearizace, interpolace, extrapolace apod.

Podle vlivu chyby na výsledek měření se rozlišují chyby:

- náhodné,
- systematické,
- hrubé.

*Náhodné chyby* působí, jak z názvu vypovídá, nahodile. Jejich výskyt nelze eliminovat ani předvídat. Při opakovaném měření za stejných podmínek totiž mění svou velikost i znaménko. Určování velikosti náhodných chyb je tak možné pouze s využitím statistických metod. V praxi je velmi často užíváno normální rozdělení. [4]

Opakovanými nezávislými měřeními provedenými za stejných podmínek jsou z důvodu výskytu náhodných chyb obdrženy různé hodnoty měřené veličiny. Jako odhad skutečné hodnoty poté slouží aritmetický průměr  $\bar{x}$  naměřených hodnot. [4]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.3)$$

kde  $x_i$  je naměřená hodnota a  $n$  je počet měření.

Odhad náhodné chyby  $i$ -tého měření lze určit jako:

$$e_i = x_i - \bar{x} \quad (1.4)$$

Rozptyl naměřených hodnot lze charakterizovat směrodatnou odchylkou výběrového souboru  $s$ , anebo směrodatnou odchylkou aritmetického průměru  $s_{\bar{x}}$ , podle následujících vztahů

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (1.5)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \quad (1.6)$$

Hodnota směrodatné odchylky ale není hodnota chyby, vyjadřuje pouze hranici, kterou může náhodná chyba s určitou pravděpodobností překročit, nebo ne. Určit náhodné chyby tedy nelze, lze je však zhodnotit nejistotou měření (kap. 1.2). [3]

*Systematické chyby* se při stejných podmínkách měření nemění, anebo se mění při změně podmínek měření podle závislosti, kterou lze určit. K jejich stanovení stačí většinou vztah (1.1) pro výpočet absolutní chyby. Tím, že lze tento druh chyb odhadnout, lze kompenzovat jejich vliv na měření vhodnou korekcí, kompenzací nebo odstraněním příčin vzniku. Některou z těchto možností tedy odstraníme pouze odhad systematické chyby, ne její skutečnou hodnotu. Měření tak stále zůstává ovlivněno částí systematické chyby nazývanou nevyhloučitelnou systematickou chybou, kterou hodnotíme pomocí nejistot. [3]

*Hrubé chyby* jsou zcela nevyzpytatelné. Při opakovaném měření je možné označit hodnoty zatížené tímto druhem chyb, protože se vyznačují výraznou odlišností od ostatních hodnot. Tato měření je pak vhodné vyloučit z dalšího zpracování, protože znehodnocují výsledek měření. Hrubé chyby jsou často zapříčiněny nedodržením měřicího postupu, podmínek měření nebo nepozorností obsluhy. [4]

*Výslednou chybu měření*  $\Delta_x$  vyjadřuje součet systematické ( $e$ ) a náhodné ( $\epsilon$ ) složky chyby. Pro odhad maximální hodnoty výsledné chyby je možné použít vztah (1.8).

$$\Delta_x = e + \epsilon \quad (1.7)$$

$$\Delta_{max} = e + \epsilon = (\bar{x} - x_s) + 2s \quad (1.8)$$

kde hodnota náhodé složky souvisí s typem rozdělení a šířkou pravděpodobnostního intervalu. Pro často užívané Gaussovo rozdělení a 95 % interval pravděpodobnosti je směrodatná odchylka rozšířena dvojkou. [4]

## 1.2. Nejistoty měření

Nejistota měření je parametr, který udává rozptyl hodnot přiřazených měřené veličině. Jinak řečeno vymezuje interval, ve kterém lze očekávat skutečnou hodnotu měřené veličiny s danou pravděpodobností. Nejistota měření je tak projevem nedokonalostí měření. Zdrojů nejistot je celá řada, mezi ty nejčastější se řadí [3][4]:

- neúplná definice měřené veličiny,
- nevhodný výběr přístroje nebo vzorku,
- nevhodný postup měření,
- vliv podmínek prostředí,
- rozlišení přístrojů,
- nepřesnost etalonů,
- nevhodné metody při zpracování výsledků, atd.

Při určování nejistot se vychází z předpokladu, že hodnoty měřené veličiny, ale i chyby, vykazují při opakovaném měření znaky určitých rozdělení pravděpodobnosti. Statistika a teorie pravděpodobnosti se tak stávají základním prostředkem pro vyhodnocení výsledků měření. [3]

Základní charakteristikou nejistoty je standartní nejistota, značená  $u$ . Ta odpovídá směrodatné odchylce daného rozdělení pravděpodobnosti. Ke stanovení standartní nejistoty jsou k dispozici dvě metody [3]:

- standartní nejistoty stanovené metodou A (nejistoty typu A),
- standartní nejistoty stanovené metodou B (nejistoty typu B).

Zkrácené označení metod je často mylně pochopeno jako rozdělení nejistot podle jejich zdroje. Jedná se však o rozlišení metod jejich stanovení.

*Standartní nejistota typu A* ( $u_A$ ) je získávána statistickým zpracováním naměřených hodnot  $n$  opakovaných měření, přičemž považuje zdroje nejistot za neznámé. Výsledný odhad hodnoty měřené veličiny je reprezentována výběrovým (aritmetickým) průměrem, příslušná nejistota pak odpovídá směrodatné odchylce (vzorce (1.5) a (1.6)). Charakteristickým znakem nejistot typu A je pokles jejich hodnoty při nárůstu počtu opakovaných měření. Dále je nutné si uvědomit, že pro malý počet měření ( $n < 10$ ) není tato metoda spolehlivá a nejistotu je potřeba odhadnout metodou B z jiných informací. [3][4]

*Standartní nejistota typu B* ( $u_B$ ) je získávána jiným způsobem než nejistota typu A. Nevychází z matematického zpracování dat, ale uvažuje známé nebo identifikovatelné zdroje nejistot. Nejčastěji jsou tak využívány údaje o měřidle od výrobce, zkušenosti z předchozích měření, zkušenosti s chováním materiálů a použité techniky, údaje z certifikátů a kalibrací a nejistoty referenčních údajů z příruček. Počet měření tak nemá vliv na hodnotu této nejistoty. [4]

Při určování nejistoty typu B jsou hledány dílčí nejistoty jednotlivých zdrojů. V některých případech je tato nejistota  $u_{Bzj}$  známa, pokud ne, lze ji určit z maximální odchylky zdroje nejistoty následujícím vztahem (1.9). [4]

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (1.9)$$

kde  $z_{jmax}$  je maximální odchylka  $j$ -tého zdroje nejistoty,  $k$  je součinitel vycházející z rozdělení příslušného danému zdroji.

Výsledná nejistota typu B pro  $p$  zdrojů se pak určí dle vztahu (1.10) a dostává tak také charakter směrodatné odchylky.

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (1.10)$$

kde  $A_j$  jsou součinitele citlivosti jednotlivých zdrojů.

Protože každá z těchto metod pokryje jen část zdrojů nejistot, je jejich součtem určena *kombinovaná nejistota* ( $u_C$ ). Standartní nejistota dosud popsaná vytváří interval pravděpodobnosti 66 až 68 %, což je však hodnota v praxi nevyhovující. Proto je nutné tento interval zvětšit. Zavádí se proto tzv. *rozšířená nejistota* ( $U$ ). Vztah mezi výsledky opakovaných měření a nejistotami měření je graficky znázorněn na obr. 1.1. [3][4]

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1.11)$$

$$U = k_r u_c \quad (1.12)$$

kde  $k_r$  je koeficient rozšíření.

Hodnota koeficientu rozšíření je závislá na uvažovaném typu rozdělení pravděpodobnosti a velikosti intervalu pravděpodobnosti. Nejčastěji používaná rozdělení pravděpodobnosti jsou i s typickými příklady užití přehledně popsána v [5].

### 1.2.1. Zákon šíření nejistot

Zákon šíření nejistot stanovuje, jak určovat nejistotu odhadu veličiny, která je funkcí jiných veličin. Přičemž jsou známy odhady i nejistoty těchto veličin. Slouží tedy při výpočtu nejistoty při nepřímém měření hledané hodnoty. [3]

Pro výstupní veličinu  $Y$ , která je funkcí  $n$  veličin  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , ve tvaru

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1.13)$$

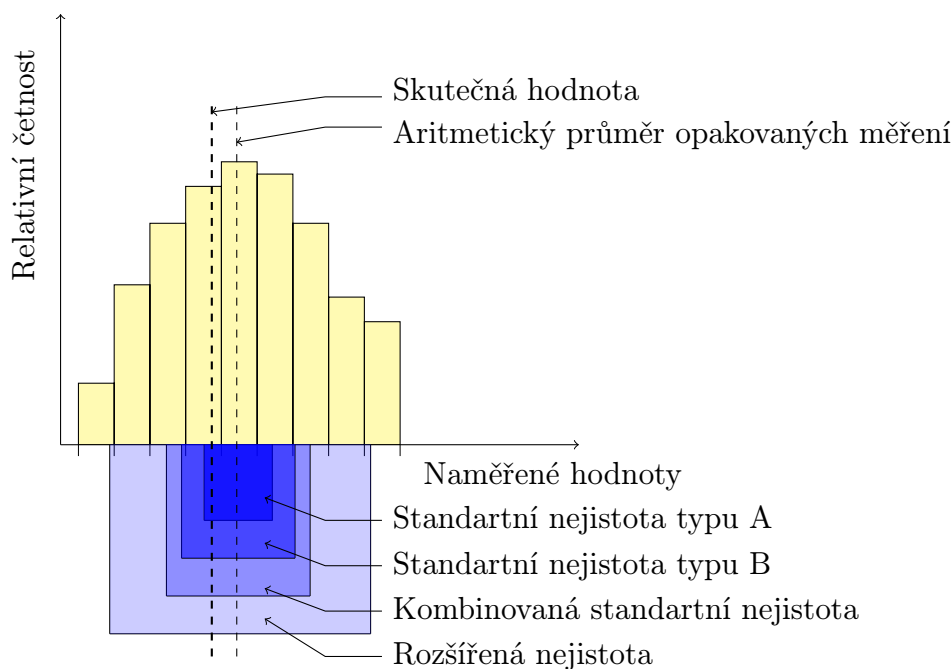
lze určit odhad  $y$  veličiny  $Y$  jako

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.14)$$

kde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  jsou odhady veličin  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . [3]

Nejistotu odhadu  $y$  lze určit ze vztahu (1.15). Předpokladem pro platnost uvedeného vztahu je, že odhady  $x_1$  až  $x_n$  jsou nekorelované a funkci  $f$  lze linearizovat Taylorovým rozvojem se zanedbáním vyšších členů rozvoje. [3]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^n A_i^2 u_{x_i}^2 \quad (1.15)$$



Obr. 1.1: Vztah mezi výsledky opakovaných měření a standartními nejistotami měření [3]

kde  $A_i$  jsou citlivostní koeficienty, pro něž platí

$$A_i = \left. \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_n)}{\partial X_i} \right|_{i=1 \dots n} \quad (1.16)$$

Korelace odhadů je vyjádření jejich vzájemné závislosti. Příkladem může být použití jednoho přístroje k provedení několika měření, kalibrace několika přístrojů ke stejné referenci nebo ovlivnění přístrojů stejnými vnějšími vlivy (tlak, teplota, vlhkost). [6]

Pro korelované odhady  $x_1, x_2, \dots, x_n$  je nutné uvažovat mezi nimi i kovariance, jako další složky nejistoty. Kovariance odhadů určují, jak jsou vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot. Výslednou nejistotu tak mohou zvýšit nebo snížit (podle charakteru a podle tvaru funkce pro výpočet výsledné veličiny). Vztah pro nejistotu korelovaných vstupních veličin vyjadřuje následující rovnice (1.17). [3]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^n A_i^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=2}^n \sum_{j<i}^{n-1} A_i A_j u_{x_{i,j}} \quad (1.17)$$

kde  $u_{x_{i,j}}$  je kovariance mezi korelovanými odhady  $x_i$  a  $x_j$ . Určení kovariancí je obdobné jako u nejistot a to metodou typu A nebo metodou typu B.

Metoda typu A vychází, jako v případě nejistot, ze statistického zpracování naměřených dat. Tato metoda se používá, je-li naměřeno  $n$  hodnot obou veličin  $x_i, x_j$ . Kovariance metodou typu A se poté vypočítá podle vztahu (1.18), kde jsou odhady veličin vyjádřeny jako aritmetické průměry. [7]

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (1.18)$$

Metoda typu B stanovuje kovariance na základě údajů o měřidle, z certifikátů, zkušenosti nebo výpočtem. V případě výpočtu se nejprve odhadnou zdroje korelací. Poté se

(na základě zkušeností) odhadne korelační koeficient  $r(x_i, x_j)$  pro každou dvojici odhadů. Korelační koeficient vyjadřuje míru závislosti odhadů. Může nabývat hodnot od -1 do +1, přičemž blízkost k těmto hodnotám ukazuje na silnou závislost. Nezávislé odhady mají korelační koeficient roven nule. Kovariance se pak určí podle vztahu (1.19). [7]

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j) \quad (1.19)$$

Pokud jsou dvě vstupní veličiny  $X_1, X_2$  s odhady  $x_1, x_2$  funkcemi nezávislých veličin  $Z_1$  až  $Z_m$ , určí se kovariance mezi odhady podle vztahu (1.21). [7]

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m), \quad X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m) \quad (1.20)$$

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) \quad (1.21)$$

kde  $A_{1i}, A_{2i}$  jsou citlivostní koeficienty funkcí  $g_1, g_2$ .

### 1.2.2. Praktické výpočty nejistoty měření

Pro lepší pochopení celého postupu určování nejistoty měření jsou v této části uvedeny dva příklady zjednodušeného výpočtu pro přímé a nepřímé měření. Podkladem pro použité výpočty se staly úlohy provedené během výuky předmětu Experimentální metody.

### Měření průtoku vody plováčkovým průtokoměrem

Pro ilustraci výpočtu nejistoty přímého měření je vybráno měření průtoku vody plováčkovým průtokoměrem (rotametrem). Měření je provedeno na rotametu o parametrech uvedených v tabulce 1.1. Měřený průtok se odečítá podle vertikální polohy tělíska uvnitř trubice z transparentního materiálu s vyznačenou stupnicí. Účinkem proudící tekutiny se tělísko uvede do rotačního pohybu, čímž se stabilizuje jeho poloha v trubici. Jelikož je hodnota průtoku odečtená na průtokoměru konečná, jde o přímé měření. To však nemusí platit vždy. Údaj přístroje závisí na hustotě měřené látky. Bude-li se měřit rotametrem jiná látka, než na kterou byl kalibrován, musí být proveden přepočít podle hustoty.

Tab. 1.1: Parametry rotametu

Měřidlo	Rotametr plováčkový
Měřicí rozsah	10 až 100 l · h <sup>-1</sup>
Přesnost	±4 %
Dílek	5 l · h <sup>-1</sup>
Médium	voda, 20 °C

Pro následující vyhodnocení bylo provedeno 10 odečtů objemového průtoku vody na stupnici rotametu. Naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 1.2. Konečnou hodnotou průtoku je aritmetický průměr naměřených hodnot, který je uveden na konci tabulky.

Nejistotou typu A je směrodatná odchylka aritmetického průměru podle rovnice (1.6).



Tab. 1.2: Naměřené hodnoty průtoku vody a jejich aritmetický průměr

číslo měření	$q_v$ [l h <sup>-1</sup> ]
1	45
2	47
3	43
4	45
5	45
6	45
7	47
8	50
9	43
10	47
$\bar{q}_v$ [l h <sup>-1</sup> ]	45,7

$$u_A(\text{prutok}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{v,i} - \bar{q}_v)^2}{n(n-1)}} = 0,6675 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (1.22)$$

Nejistota typu B je dána na základě informací o měřidle a postupu měření. Přesnost měření je tedy přibližně 4 %. Protože hodnoty přesnosti uváděné výrobcem odpovídají rozšířené nejistotě, je nutné tuto hodnotu převést na standardní nejistotu. Pro parametry měřidel se standardně uvažuje rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti ( $k=\sqrt{3}$ ).

$$u_B(\text{rotametr}) = \sqrt{\left(\frac{0,04 \cdot \bar{q}_v}{\sqrt{3}}\right)^2} = 1,0554 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (1.23)$$

Chyba lidského faktoru vzniká při odečtu průtoku ze stupnice rotametru. Předpokladem je rozlišovací schopnost 25 % délky dílku. Nejistota typu B průtoku je potom součtem chyby měřidla a chyby obsluhy.

$$u_B(\text{obsluha}) = \sqrt{\left(\frac{0,25 \cdot 5}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,7217 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (1.24)$$

Kombinovaná nejistota je určena jako součet čtverců nejistot typu A a B. Tato nejistota platí pro konfidenční úroveň přibližně 68 %. Z důvodu vyšších nároků na přesnost je určena rozšířená nejistota pro standardně využívaný interval 95 %. Hodnoty výpočtu nejistoty měření průtoku jsou shrnuty v bilanční tabulce 1.3.

$$\begin{aligned} u_c(\text{prutok}) &= \sqrt{u_A^2(\text{prutok}) + u_B^2(\text{rotametr}) + u_B^2(\text{obsluha})} = \\ &= \sqrt{0,6675^2 + 1,0554^2 + 0,7217^2} = 1,4423 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$U(\text{prutok}) = k u_c(\text{prutok}) = 2 \cdot 1,4423 = 2,8846 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1} \quad (1.26)$$

Výslednou hodnotou objemového průtoku vody je  $(45,7 \pm 2,9) \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Tab. 1.3: Bilanční tabulka nejistot měření průtoku plovákovým průtokoměrem

Veličina $X_i$	Odhad $x_i$	Standartní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti $A_i$	Příspěvek ke standartní nejistotě $u_i(q)$ ; nejistota $u(q)$
$[-]$	$[l \cdot h^{-1}]$	$[l \cdot h^{-1}]$	$[-]$	$[-]$	$[l \cdot h^{-1}]$
$\bar{q}_v$	45,7	0,6675	normální	1	0,6675
měřidlo	0,0	1,0554	rovnoměrné	1	1,0554
obsluha	0,0	0,7217	rovnoměrné	1	0,7217
$q_v$	45,7	1,4423			1,4423

## Stanovení hustoty kapaliny pyknometricky

Postup pro vyhodnocení standartní nejistoty nepřímého měření je ukázán na příkladu určení hustoty pomocí pyknometru. Tato metoda je možná díky skutečnosti, že při zachování stejného objemu zkoumané a srovnávací kapaliny je poměr hmotností kapalin stejný jako poměr jejich hustot. Hustota vzorku je pak vyjádřena podle rovnice (1.27). Jedná se o jednu z nejpresnějších metod pro měření hustoty. Přesnou odměrnou nádobou je zde skleněný pyknometr (podle Gay-Lussaca) skládající se z odměrné nádoby a zátky s kapilárou pro odvod přebytečné kapaliny.

$$\rho_{vzorek} = \frac{m_{vzorek} - m_0}{m_{voda} - m_0}(\rho_{voda} - \rho_{vzduch}) + \rho_{vzduch} \quad (1.27)$$

kde  $m_{vzorek}$  je hmotnost pyknometru se vzorkem [g],  $m_0$  je hmotnost prázdného pyknometru [g],  $m_{voda}$  je hmotnost pyknometru s vodou [g],  $\rho_{voda}$  je hustota vody [ $g \cdot cm^{-3}$ ] a  $\rho_{vzduch}$  je hustota vzduchu [ $g \cdot cm^{-3}$ ].

Pro výpočet hustoty zkoumané kapaliny je třeba nejprve zvážit prázdný pyknometr. Poté je pyknometr naplněn referenční kapalinou, uzavřen zátkou, osušen celulóзовou buničinou a zvážen. Následuje stejný postup pro zkoumanou kapalinu, kdy je před samotným naplněním pyknometr několikrát vypláchnut touto kapalinou, aby se minimalizovalo ovlivnění měření přítomností předchozí kapaliny. Při měření je třeba dbát na konstantní provozní podmínky v laboratoři a teplotu obou kapalin. Je tomu tak z důvodu závislosti hustoty na teplotě. Objem pyknometru je také ovlivnitelný teplotou a lze jej tak použít pouze při teplotě na něm uvedené.

Referenční kapalinou je v tomto případě destilovaná voda, měřeným vzorkem pak neznámá kapalina. V následujících tabulkách jsou uvedeny parametry pyknometru, parametry analytické váhy, hmotností prázdného a naplněného pyknometru pro 10 opakovaných měření. Pro další výpočty je uvažována teplota kapalin rovna teplotě okolí  $(21 \pm 2)^\circ C$ .

Z naměřených hodnot jsou vypočítány aritmetické průměry hmotnosti pyknometru  $m_0$ , hmotnosti destilované vody  $m_{voda}$ , hmotnosti vzorku  $m_{vzorek}$  a teploty v laboratoři. Pro střední hodnotu teploty jsou stanoveny měrné hmotnosti vody a vzduchu. Hustota destilované vody je určena interpolací tabelovaných hodnot hustoty vody v [16]. Hustota destilované vody pro  $21^\circ C$  je  $997,9898 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ . Hustota vzduchu pro  $21^\circ C$  je interpolována z tabulek a vychází  $1,201 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ .

Tab. 1.4: Parametry pyknometru a analytických vah

Měřidlo	Pyknometr podle Gay-Lussaca	Měřidlo	Analytické váhy
Objem	50 ml	Váživost	420 g
Přesnost	3 ml	Dělení d	1 mg
Průměr d	50 mm	Opakovatelnost	1 mg
Výška h	85 mm	Linearita	2 mg

Tab. 1.5: Naměřené hodnoty hmotností pyknometru a jejich aritmetické průměry

číslo měření	$m_0$ [g]	$m_{voda}$ [g]	$m_{vzorek}$ [g]
1	20,069	75,027	86,251
2	20,068	75,027	86,252
3	20,072	75,028	86,255
4	20,069	75,030	86,251
5	20,069	75,029	86,253
6	20,069	75,027	86,250
7	20,069	75,026	86,251
8	20,069	75,025	86,253
9	20,070	75,026	86,251
10	20,069	75,027	86,252
	$\bar{m}_0$ [g]	$\bar{m}_{voda}$ [g]	$\bar{m}_{vzorek}$ [g]
	20,069	75,027	86,252

Nejistota typu A je určena jako směrodatná odchylka aritmetického průměru podle vztahu (1.6).

$$u_A(m_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{0,i} - m_0)^2}{n(n-1)}} = 0,000335 \text{ g} \quad (1.28)$$

$$u_A(m_{voda}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{voda,i} - m_{voda})^2}{n(n-1)}} = 0,000467 \text{ g} \quad (1.29)$$

$$u_A(m_{vzorek}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{vzorek,i} - m_{vzorek})^2}{n(n-1)}} = 0,000458 \text{ g} \quad (1.30)$$

Nejistota typu B je stanovena ze známých informací o měřidlech a postupu měření. Pyknometr má podle údajů prodejce přesnost 3 ml z celkového objemu 100 ml. V tomto případě jde o přesnost výrobní, která pro toto měření nemá vliv, protože objem nádoby není zohledňován. U použitých analytických vah je uvedena hodnota jednoho dílku 1 mg, dále opakovatelnost<sup>1</sup> 1 mg a linearita vah 2 mg. U těchto vlastností se uvažuje rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti jako v předchozím případě.

<sup>1</sup>Opakovatelnost je shodnost měření pro stejné podmínky. Linearita značí největší odchylku hodnoty zobrazené na displeji a hodnoty skutečné v celém rozsahu měřidla.[8]

$$u_B(vahy) = \sqrt{\left(\frac{0,001}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,002}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,001414 \text{ g} \quad (1.31)$$

Chyba lidského faktoru při manipulaci s pyknometrem je započítána jako 0,1 g s uvažováním rovnoměrného rozdělení. Nejistota typu B pro jednotlivé hmotnosti je potom součtem chyby měřidla a chyby obsluhy.

$$u_B(obsluha) = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0,057735 \text{ g} \quad (1.32)$$

Hodnota hustoty destilované vody pro 21 °C je stanovena interpolací z tabulek. Stejně tak je zjištěna i hustota vzduchu. Přesnost interpolace je 0,01 kg·m<sup>-3</sup>.

$$u_B(\rho_{voda}) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,005773 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (1.33)$$

$$u_B(\rho_{vzduch}) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,005773 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (1.34)$$

Standartní nejistota vstupních veličin je potom součtem čtverců nejistoty typu A a nejistoty typu B. Pro jednotlivé hmotnosti se tak jedná o příslušnou směrodatnou odchylku, nejistotu vah a nejistotu obsluhy. Standartní nejistota hustot je rovna dané nejistotě typu B. Protože se jedná o nepřímé měření je nutné využít zákona šíření nejistot (vztah (1.17)). Vzhledem k tomu, že je ke všem měřením použit stejný pyknometr, je nutné uvažovat korelace mezi hodnotami hmotností. Korelační koeficient je volen 1, čímž vyjadřuje silnou závislost. Jelikož jsou nejistoty typu B pro všechny hmotnosti stejné, jsou stejné i kovariance.

$$u_B(m_0, m_{voda}) = r(m_0, m_{voda})u_B(m_0)u_B(m_{voda}) = 1 \cdot 0,057753^2 = 0,003335 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (1.35)$$

Citlivostní koeficienty jsou určeny jako parciální derivace výpočtového vztahu pro hustotu vzorku počítanou ze vztahu (1.27).

$$\begin{aligned} A_{m_0} &= \frac{\partial \rho_{vzorek}}{\partial m_0} = \frac{(\rho_{voda} - \rho_{vzduch})(m_{vzorek} - m_{voda})}{(m_{voda} - m_0)^2} = \\ &= \frac{(997,990 - 1,201)(86,252 - 75,027)}{(75,027 - 20,069)^2} = 3,704 \text{ cm}^{-3} \end{aligned} \quad (1.36)$$

$$\begin{aligned} A_{m_{voda}} &= \frac{\partial \rho_{vzorek}}{\partial m_{voda}} = \frac{(\rho_{vzduch} - \rho_{voda})(m_{vzorek} - m_0)}{(m_{voda} - m_0)^2} = \\ &= \frac{(1,201 - 997,990)(86,252 - 20,069)}{(75,027 - 20,069)^2} = -21,842 \text{ cm}^{-3} \end{aligned} \quad (1.37)$$

$$A_{m_{vzorek}} = \frac{\partial \rho_{vzorek}}{\partial m_{vzorek}} = \frac{\rho_{voda} - \rho_{vzduch}}{m_{voda} - m_0} = \frac{997,990 - 1,201}{75,027 - 20,069} = 18,137 \text{ cm}^{-3} \quad (1.38)$$

$$A_{\rho_{voda}} = \frac{\partial \rho_{vzorek}}{\partial \rho_{voda}} = \frac{m_{vzorek} - m_0}{m_{voda} - m_0} = \frac{86,252 - 20,069}{75,027 - 20,069} = 1,204 \quad (1.39)$$

$$A_{\rho_{vzduch}} = \frac{\partial \rho_{vzorek}}{\partial \rho_{vzduch}} = \frac{m_0 - m_{vzorek}}{m_0 - m_{voda}} - 1 = \frac{20,069 - 86,252}{20,069 - 75,027} = 0,204 \quad (1.40)$$

Dalším krokem je dosazení hodnot do rovnice zákona šíření nejistot (1.17) a vyjádření standartní nejistoty. Tento postup je shrnut v bilanční tabulce 1.6. V posledním řádku je uvedena výsledná hustota měřeného vzorku a vedle ní standartní nejistota měření jako odmocnina součtu jednotlivých příspěvků, což je hodnota úplně vpravo.

Tab. 1.6: Bilanční tabulka nejistot měření hustoty pyknometrem

Veličina $X_i$	Odhad $x_i$	Standartní nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti $A_i$	Příspěvek ke standartní nejistotě $u_i^2(\rho)$ ; nejistota $u^2(\rho)$
$[-]$	$[g]; [g \cdot cm^{-3}]$	$[g \cdot cm^{-3}]$	$[-]$	$[cm^{-3}]; [-]$	$[g]$
$m_0$	20,069	0,0578	rovnoměrné	3,7044	0,0458
$m_{voda}$	75,027	0,0578	rovnoměrné	-21,8417	1,5913
$m_{vzorek}$	86,252	0,0578	rovnoměrné	18,1373	1,0973
$\rho_{voda}$	997,990	0,0058	rovnoměrné	1,2042	4,83E-5
$\rho_{vzduch}$	1,201	0,0058	rovnoměrné	0,2042	1,39E-6
korelace	$m_0, m_{voda}$		rovnoměrné		-0,5397
korelace	$m_0, m_{vzorek}$		rovnoměrné		0,4482
korelace	$m_{voda}, m_{vzorek}$		rovnoměrné		-2,6426
$\rho_{vzorek}$	1201,6	1,6			2,643

Standartní kombinovaná nejistota měření uvedená v tabulce, je vyjádřena pro spolehlivost výsledku přibližně 68 %. Běžně se ale vyžaduje interval spolehlivosti vyšší. Proto je tato hodnota rozšířena koeficientem rozšíření  $k_r=2$  (pro normální rozdělení) na interval spolehlivosti 95 %. Výsledkem tohoto příkladu je tedy stanovení hustoty vzorku  $(1201,6 \pm 3,3) kg \cdot m^{-3}$ .



## 2. Metody měření průtoku

Za označením měření průtoku se mnohdy skrývá měření objemového/hmotnostního průtoku, měření rychlosti proudícího média nebo měření kumulovaného průtoku. Kapitola s názvem metody měření průtoku proto stručně představuje druhy měřidel průtoku, resp. jejich základní principy měření. Dále je věnován prostor normalizované cloně, zejména pak výpočtu hmotnostního průtoku.

### 2.1. Měřidla průtoku

V následujících odstavcích je uvedeno základní rozdělení měřidel průtoku na základě informací z kapitoly 10 [3] a z kapitoly 9 [9].

#### 2.1.1. Objemová měřidla

Tato měřidla jsou založena na měření množství tekutiny v čase. Principiálně se řadí mezi absolutní metody měření a vyznačují se vysokou přesností, díky níž jsou využívána při kalibracích. [9]

*Objemová měřidla průtočného množství s přerušovanou činností* se používají k určení celkového množství protečené tekutiny. Pokud je zaznamenáván i čas, lze je využít i k měření aktuálního průtoku. Z hlediska přesnosti je nejvýhodnější měření hmotnosti tekutiny, které je následně přepočteno na objem. Pro malé objemy jsou užívány kalibrované odměrné nádoby, pipety, u větších objemů pak nádrže nebo zvonový kubikometr. [9]

*Objemová měřidla průtočného množství s nepřerušovanou činností* (obr. 2.1). Základem měřicí metody těchto měřidel je cyklické plnění a vyprazdňování odměrných komor tekutinou. Průtok je poté určen z počtu cyklů a známého objemu komor. Při správné kalibraci dosahují chyby měření až 0,5 % rozsahu. Mohou se používat i v otevřeném potrubí, jsou však náchylné na zanášení. Mezi tato měřidla se tak řadí bubnové měřidlo průtočného množství, kyvné váhy, pístové měřidlo průtočného množství, měřidlo průtočného množství s rotujícími písty, měřidlo průtočného množství s krouživým pístem, mechanické plynoměry atd. [3]

#### 2.1.2. Rychlostní měřidla

Rychlostní měřidla využívají závislosti průtoku na průtočném průřezu a rychlosti tekutiny. Podle rychlosti měřeného média jsou rozlišovány měřidla průtoku a měřidla rychlosti (rychlostní sondy). [9]

*Měřidla průtoku* využívají roztáčení lopatek tlakem proudící tekutiny. Počet otáček je přitom snímán mechanicky nebo elektronicky a určuje celkové protečené množství tekutiny. V praxi jsou tato měřidla nejčastěji používána k měření průtoku vody, proto jsou mnohdy označovány jako vodoměry. Podle konstrukce jsou děleny na jednotokové, vícevtokové a turbínkové (obr. 2.2i). [3]

*Měřidla rychlosti* jsou určena k měření okamžité nebo střední rychlosti proudu. Rychlostní sondy (obr. 2.2ii), mezi něž patří Pitotova a Prandtlova trubice, válcová sonda atd., měří rychlost podle dynamického tlaku tekutiny. Přitom jsou velice ovlivněny po-

lohou a natočením v proudu tekutiny. Nejčastěji se využívají ke stanovení rychlostního profilu. [3]

Další skupinou měřidel rychlosti jsou anemometry měřící rychlost plynu způsobující rotaci lopatek nebo misek měřidla. Dále lze použít termoanemometry, které měří rychlost podle ochlazování snímače (tenké vlákno) v závislosti na rozměrech, teplotě, tlaku, hustotě a tepelných vlastnostech tekutiny. [3]



(i) Člunkový překlápěcí průtokoměr [10]



(ii) Šroubový průtokoměr série RS [11]

Obr. 2.1: Objemová měřidla



(i) Turbínkové průtokoměry VTR [12]



(ii) Rychlostní sonda ITABAR IBR [12]

Obr. 2.2: Rychlostní měřidla

### 2.1.3. Průtokoměry využívající tlakovou ztrátu tekutiny

Tyto průtokoměry využívají k měření tlakovou ztrátu na škrtícím prvku umístěném v potrubí nebo změnu tlaku při změně směru průtoku. Vyznačují se tak jednoduchou konstrukcí, ale také vyšší tlakovou ztrátou. Rozdělují se na průřezové a kolenové průtokoměry. [9]



*Průřezové průtokoměry* využívají změny tlakové energie v kinetickou energii při průtoku tekutiny zúženým průřezem. Rozlišují se výtoková a průtoková průřezová měřidla. Výtoková měřidla jsou např. přepady nebo danaida, kdy tekutina vytéká do volného prostoru. Průtoková měřidla jsou naopak umístěna v potrubí. Mezi tyto škrtící orgány se řadí normalizovaná clona, normalizovaná dýza, normalizovaná venturiho trubice, segmentová clona, dvojitá clona, čtvrtkruhová clona, měřicí kapilára. Na obrázku 2.3 jsou uvedeny některé z nich. [9]

*Kolenové průtokoměry* vytvářejí tlakovou diferenci změnou směru průtoku (nejčastěji o 90°). Rychlost proudu a tedy i statický tlak se mění v závislosti na poloměru zakřivení potrubí a největšího rozdílu dosahuje v ose souměrnosti zakřivení. Nevýhodou tohoto průtokoměru je vznik turbulentních proudů, které ovlivňují přesnost měření.[9] V praxi tak často nejsou využívány.



Obr. 2.3: Průtokoměry využívající tlakovou ztrátu tekutiny [13]

#### 2.1.4. Průtokoměry využívající dynamické působení tekutiny

*Fluidikový průtokoměr* je založen na tzv. Coandovu efektu. Podstatou je, že pokud tekutina proudí dostatečnou rychlostí mezi dvěma stěnami blízko u sebe, má tendenci se přimknout k jedné ze stěn. Průtokoměr se pak skládá ze dvou usměrňovačů, ke kterým se tekutina střídavě přichyluje. Tuto oscilaci zajišťuje malá část kapaliny, která se při přiblížení k usměrňovači oddělí od zbytku proudu, obteče jej a vrátí se do proudu, čímž jej vychýlí a dojde k přimknutí k protilehlému usměrňovači. Frekvence oscilací je potom úměrná rychlosti proudu. [3]

*Vírový průtokoměr* sleduje změnu rychlosti nebo tlaku, která je spojena se vznikem vírů kolem tělesa vloženého do potrubí. Počet vírů a frekvence jejich vzniku je mírou rychlosti proudění. Změna rychlosti je zjišťována tepelným anemometrem, ultrazvukovým nebo optickým snímačem. Změna tlaku může být zjištěna tenzometricky z deformace membrány nebo piezoelektrickým snímačem. Příklad vírového průtokoměru je uveden na obrázku 2.4i. [3]

*Průtokoměry s proměnlivým průtokovým průřezem* zachovávají konstantní tlakový spád a hodnotu objemového průtoku určují podle polohy pohyblivé části průtokoměru. Jedná se o plovákový průtokoměr (obr. 2.4ii), průtokoměr s kuželovitým trnem nebo průtokoměr s otočnou lopatkou. [9]



- (i) Vírový průtokoměr Rosemount 8800D [12]      (ii) Plovákový průtokoměr – GA 24 [14]

Obr. 2.4: Průtokoměry využívající dynamické působení tekutiny

### 2.1.5. Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry měří změnu v šíření signálu protékající tekutinou. Šíření signálu médiem je ovlivněno teplotou a tlakem, proto je nutné vyloučit jejich vliv na měření. Ultrazvuková měřidla pak pracují se změnou rychlosti šíření signálu, se snímáním času průchodu signálu (posun fáze signálu) v čistých tekutinách nebo s využitím Dopplerova jevu (změna frekvence signálu vlivem odrazu od pevné částice nebo bubliny). Ultrazvukové průtokoměry mohou být přenosné nebo zabudované do potrubí (obr. 2.5) a nezpůsobují tlakovou ztrátu. [3]



- (i) Ultrazvukový průtokoměr OPTISONIC 7300 [14]

- (ii) Přenosný ultrazvukový průtokoměr Portaflow D550 [12]

Obr. 2.5: Ultrazvukové průtokoměry

### 2.1.6. Magnetické indukční průtokoměry

Magnetické indukční průtokoměry (obr. 2.6) jsou založeny na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce. Pohybem vodiče (tekutiny) v magnetické poli se indukuje napětí. Toto napětí je přímo úměrné rychlosti proudění tekutiny. Podmínkou pro správnou funkci indukčních průtokoměrů je měření zcela zaplněného potrubí vodivou (i nemagnetickou) tekutinou a konstantní hustota magnetického pole. Tato měřidla nejsou ovlivněna hustotou a viskozitou tekutiny, jejich přesnost není citlivá na změnu teploty a tlaku. [3]



(i) Magneticko-indukční průtokoměr  
OPTIFLUX 1000 [14]



(ii) Magneticko-indukční průtokoměry induQ  
VMI [12]

Obr. 2.6: Magnetické indukční průtokoměry

### 2.1.7. Hmotnostní průtokoměry

Mezi přímé metody měření hmotnostního průtoku se řadí měřidla využívající působení Coriolisovy síly, silového účinku tekutiny a kalorimetrické průtokoměry. [9]

*Průtokoměry využívající působení Coriolisovy síly* (obr. 2.7i) sestávají z trubice, která je rozkmitána rovnoměrnými knity. Při průchodu tekutiny jsou její částice urychlovány a setrvačností vzniká Coriolisova síla, která způsobuje malou deformaci trubice. Podle této deformace je pak určován hmotnostní průtok. Příkladem je hmotnostní průtokoměr s rotujícími lopatkami, průtokoměr s oběžným kolem, gyroskopický hmotnostní průtokoměr, průtokoměr s kmitajícím členem. [3]

*Průtokoměr využívající měření silového účinku tekutiny* na terčík v ose potrubí lze použít pouze v případě laminárního proudění. Působení tekutiny na překážku je měřeno např. tenzometrem a lze z něj vyjádřit hmotnostní průtok. [3]

*Kalorimetrický průtokoměr* (obr. 2.7ii) určuje hmotnostní průtok z rozdílu teplot měřených na opačných koncích průtokoměru. Uvnitř průtokoměru je umístěn ohřívač s konstantním ohřevem. Z dodaného tepla a teplot proudů lze následně určit hmotnost ohřívané tekutiny. [3]

Měřidla průtoku jsou využívána prakticky v každém provozu. Existuje široká škála výrobců a modifikací těchto měřidel. Vzhledem k neustálému vývoji nelze jednoznačně přiřadit metodu proudícímu médiu. Ve středu zájmu této práce je měření průtoku páry,



- (i) Hmotnostní průtokoměr OPTIMASS 1000 [14]      (ii) Kalorimetrický snímač průtoku vzduchu s displejem MSFSD [12]

Obr. 2.7: Hmotnostní průtokoměry

přesněji syté páry. Po prostudování nabízených snímačů, lze ale stále doporučit snímače využívající tlakové ztráty, dále vírové průtokoměry a některé druhy ultrazvukových průtokoměrů.

## 2.2. Měření průtoku páry normalizovanou clonou

Normalizovaná clona byla v předešlém výčtu zařazena mezi průřezová měřidla průtoku. Jedná se v podstatě o desku s kruhovým otvorem uprostřed. Touto zdánlivou jednoduchostí se řadí mezi jednodušší a nejčastěji užívané škrťící orgány. Výrobní požadavky na přesnost jsou ovšem vysoké a cena škrťícího prvku pak začíná na desetitisících. Rozměry clonového kotouče jsou navrhovány v závislosti na měřené tekutině, předpokládaném průtoku, provozní teplotě, tlakové diferencii, průměru potrubí, materiálu potrubí i clony a tlakovým ztrátám. Bližší informace o návrhu clony a omezeních jsou dostupné v normě ČSN EN ISO 5167 části 1 [2] a 2 [15] a je s nimi pracováno v dalších částech této práce.

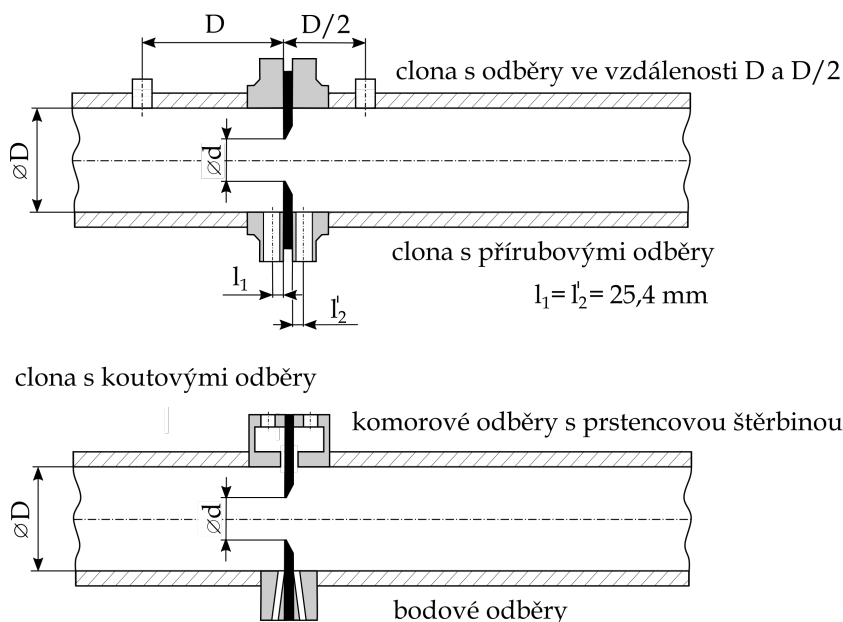
Základním předpokladem pro relevantnost měření průtoku normalizovanou clonou je instalace primárního prvku na přímém úseku potrubí zcela zaplněného tekutinou. Norma přesně definuje délku přímého úseku před a za primárním prvkem v kapitole 6. Pokud není možné zajistit dostatečně dlouhé potrubí bez hydraulických odporů, lze využít usměrňovač potrubí. Ten se umísťuje před primární prvek a omezuje zkrut proudu od použitých tvarovek.

Jelikož je pro výpočet průtoku nutné měřit statický tlak, tlakovou diferencii a teplotu, jsou ve zmíněné normě popsány základní podmínky pro umístění měřidel. Z pohledu normy [15] jsou vhodné tři typy tlakových odběrů (obr. 2.8) - koutové, přírubové a odběry ve vzdálenostech  $D$  a  $D/2$ . Pro všechny typy platí, že osa odběru musí být kolmá k ose potrubí (s tolerancí  $3^\circ$ ). Volba koutového odběru znamená dvě možnosti - bodové odběry nebo prstencovou šěrbinu. Dalším typem je přírubový odběr, ten se umísťuje ve vzdálenosti 25,4 mm od stěny clonového kotouče. Odběry ve vzdálenostech  $D$  a  $D/2$  jsou

už podle názvu umísťovány ve vzdálenosti  $D$  od přední stěny clony pro přední odběr a ve vzdálenosti  $D/2$  od zadní stěny clony pro zadní odběr.

Statický tlak je měřen před clonou. Odběry statického tlaku by neměly být použity k měření diferenčního tlaku. Výjimečně lze ale použít jeden z odběrů diferenčního tlaku i pro měření statického tlaku. Musí však být ověřeno, že nedochází k žádnému zkreslení naměřených hodnot.

Teplota je přednostně měřena za primárním prvkem. Pro zjednodušení se obecně předpokládá, že při měření diferenčního tlaku před a za clonou, je teplotní rozdíl mezi těmito dvěma body zanedbatelný. V případě, že je měřen neideální plyn, jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a je-li velká tlaková ztráta mezi předním tlakovým odběrem a místem měření teploty, je nutné určit teplotu před clonou z teploty za clonou (za předpokladu isoentropické expanze). Teplota před clonou pak slouží k posouzení, zda se neblíží teplotě rosného bodu tekutiny a nedochází tedy k nežádoucímu dvoufázovému toku. Dvoufázový tok znamená snížení přesnosti měření, jelikož se může každá fáze pohybovat jinou rychlostí.



Obr. 2.8: Typy odběrů tlaku na cloně [15]

### 2.2.1. Odvození vztahu pro objemový a hmotnostní průtok

Měření průtoku tekutiny pomocí normalizované clony patří mezi nepřímá měření. Průtok je tak vypočítán na základě zjištěných parametrů. V následující podkapitole je uvedeno odvození rovnic pro výpočet objemového a hmotnostního průtoku tekutiny, použitými v normě [2].

Výpočet průtoku je proveden na základě znalosti tlakové difference před a za clonou a vlastnostech proudícího média. Vychází se přitom z Bernoulliho rovnice (2.1) a rovnice kontinuity (2.2) [9].

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho w_1^2 + h_1\rho g = p_2 + \frac{1}{2}\rho w_2^2 + h_2\rho g \quad (2.1)$$

$$A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad (2.2)$$

kde  $p_1, p_2$  jsou tlaky před a za clonou,  $w_1, w_2$  jsou střední rychlosti tekutiny,  $\rho$  je hustota tekutiny,  $g$  je tíhové zrychlení,  $h_1, h_2$  jsou polohové výšky v místě odběru,  $A_1, A_2$  jsou průtočné průřezy potrubí a otvoru clony.

Při vodorovné poloze potrubí a s uvažováním malých rozměrů clony lze rozdíl polohových výšek  $h_1, h_2$  zanedbat. Dosazením rovnice (2.2) do rovnice (2.1) lze vyjádřit rychlost  $w_2$ . Pro objemový průtok potom platí vztah (2.3).

$$q_v = A_2 w_2 = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)/\rho}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (2.3)$$

Dosazením vztahů pro průřez potrubí a otvor clony a poměr průměrů  $\beta$  je vztah pro objemový průtok následující.

$$\beta = d/D \quad (2.4)$$

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p/\rho}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.5)$$

Uvedená rovnice platí pro nestlačitelné tekutiny a zanedbává dynamické vlivy průchodu média škrťicím orgánem. Proto je vztah pro objemový průtok dále vynásoben průtokovým součinitelem  $C$ , který vyjadřuje vliv kontrakce proudu a energetické ztráty. Při výpočtu průtoku pro stlačitelnou tekutinu je nutné vztah vynásobit také součinitelem expanze  $\epsilon$ , který je funkcí poměru tlaků a izentropického exponentu tekutiny. Stanovení obou součinitelů je popsáno níže. Vztahy pro objemový a hmotnostní průtok jsou poté vyjádřeny v rovnicích (2.6) a (2.8) a odpovídají tvaru uvedenému v normě.

$$q_v = C\epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p/\rho}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.6)$$

$$q_m = q_v \rho \quad (2.7)$$

$$q_m = C\epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p\rho}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.8)$$

*Součinitel průtoku* je definován jako poměr skutečného a teoretického průtoku. Jeho hodnotu lze nalézt v tabulkách nebo nomogramech v závislosti na hodnotě poměru průměrů  $\beta$  a Reynoldsově číslu (orientačně se pohybuje okolo 0,60 u clon a 0,95 u dýz). Pro účely dalšího výpočtu je ale využita tzv. Reader-Harris/Gallagherova rovnice (2.9) [15]. Další informace a výpočetní vztahy pro součinitel průtoku je možné nalézt např. v [16].

$$\begin{aligned} C = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6\beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A) \\ & \beta^{3,5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1}) (1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - \\ & - 0,031 \left( M_2' - 0,8M_2'^{1,1} \right) \beta^{1,3} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Pro  $D < 71,12$  mm (2,8 palce), je k rovnici přičten člen:

$$+ 0,011 (0,75 - \beta) \left( 2,8 - \frac{D}{25,4} \right) \quad (2.10)$$

Kde  $Re_D$  je Reynoldsovo číslo vypočítané k průměru potrubí  $D$ .  $L_1$ , resp.  $L'_2$  je podíl vzdálenosti předního, resp. zadního, odběru tlaku od přední, resp. zadní, strany clonového kotouče a průměru potrubí.

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi D \mu} \quad (2.11)$$

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1 - \beta} \quad (2.12)$$

$$A = \left( \frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (2.13)$$

Použití této rovnice je omezeno na clony s již zmíněnými odběry tlaků.

*Součinitel expanze* vnáší do výpočtu průtoku vliv stlačitelnosti plynu (pro nestlačitelné tekutiny je roven 1). Opět je možné jej zjistit v odpovídajících tabulkách na základě znalosti poměru absolutních tlaků, izentropického exponentu a poměru průměrů. Také zde je ale využit empirický vzorec (2.14). [15]

$$\epsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8) \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (2.14)$$

Tuto rovnici lze primárně použít, pokud je měřenou tekutinou vzduch, vodní pára nebo zemní plyn. Užití není ovšem omezeno ani pro jiné plyny a páry, pokud je znám jejich izentropický exponent. Hlavní podmínkou tak zůstává typ uspořádání odběru a poměr absolutních tlaků  $p_2/p_1 \geq 0,75$ . [15]

### 2.2.2. Tlaková ztráta

Vztah pro tlakovou ztrátu clon je podle [15] přibližně následující:

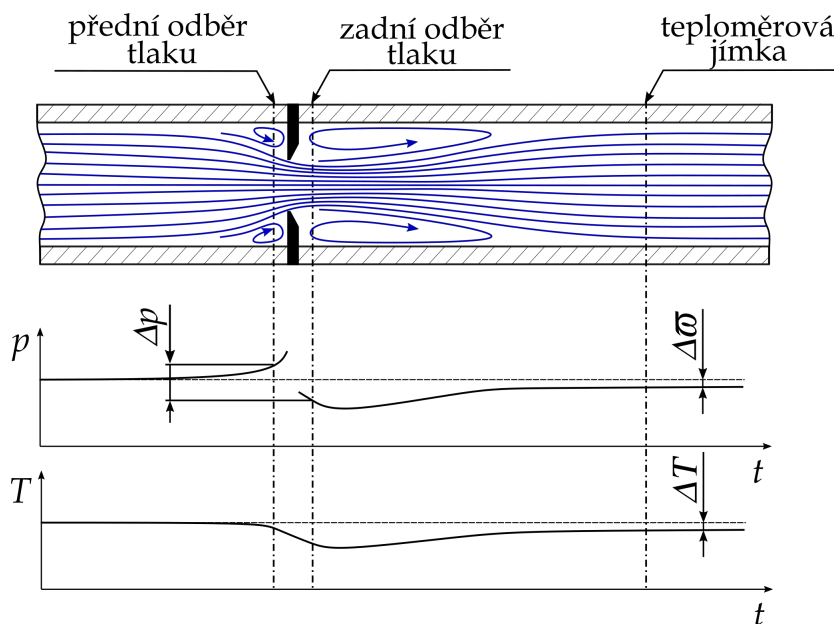
$$\Delta\tilde{\omega} = \frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C^2)} + C\beta^2} \Delta p \quad (2.15)$$

Jedná se o rozdíl statického tlaku u stěny na přední straně clony (asi  $D$  před clonou) a tlaku za clonou ve vzdálenosti přibližně  $6D$ , kde je opět uvažován pouze statický tlak. Tlakovou ztrátu způsobenou clonou tak nelze zaměňovat s měřeným diferenčním tlakem. Při měření průřezovým měřidlem se totiž využívá dynamický vliv primárního prvku na proudění. Tlakový profil proudu je znázorněn na následujícím obrázku 2.9.

### 2.2.3. Výpočet nejistoty průtoku dle ČSN EN ISO 5167

Norma ČSN EN ISO 5167-1 [2] uvádí praktický pracovní vzorec pro výpočet relativní nejistoty vycházející z rovnice (2.8). Vztah (2.16) předpokládá vzájemnou nezávislost nejistot  $C$ ,  $\epsilon$ ,  $d$ ,  $\Delta p$  a  $\rho$  a je vhodný pro většinu praktických užití. Ve skutečnosti však hodnoty veličin dosazovaných do výpočtu průtoku nezávislé nejsou.

$$\frac{u_{q_m}}{q_m} = \sqrt{\left( \frac{u_C}{C} \right)^2 + \left( \frac{u_\epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1 - \beta^4} \right)^2 \left( \frac{u_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{2}{1 - \beta^4} \right)^2 \left( \frac{u_d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{u_\rho}{\rho} \right)^2} \quad (2.16)$$



Obr. 2.9: Průběh statického tlaku a teploty proudění [15][16]

Relativní nejistoty součinitele průtoku a expanze jsou určeny dle normy [15] následovně. Nejistoty zbývajících veličin ( $D$ ,  $d$ ,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ) musí být určeny na základě informací o měřidlech a použitých zdrojích.

*Nejistota součinitele průtoku  $C$*

Podle 5.3.3.1 [15] je relativní nejistota  $C$  pro standardizované typy odběrů následující:

$$\begin{aligned} u_C/C &= (0,7 - \beta) \% && \text{pro } 0,1 \leq \beta < 0,2, \\ u_C/C &= 0,5 \% && \text{pro } 0,2 \leq \beta \leq 0,6, \\ u_C/C &= (1,667\beta - 0,5) \% && \text{pro } 0,6 < \beta \leq 0,75. \end{aligned}$$

Pro  $D < 71,12$  mm je k předchozím hodnotám nutné aritmeticky přičíst

$$+ 0,9 (0,75 - \beta) \left( 2,8 - \frac{D}{25,4} \right) \% \quad (2.17)$$

Je-li  $\beta > 0,5$  a  $Re_D < 10000$ , pak je nutné k předchozím hodnotám aritmeticky přičíst

$$+ 0,5 \% \quad (2.18)$$

*Nejistota součinitele expanze  $\epsilon$*

Podle 5.3.3.2 [15] je relativní nejistota vyjádřena jako

$$u_\epsilon/\epsilon = 3,5\Delta p/(\kappa p) \% \quad (2.19)$$

Všechny uvedené vztahy je možné nalézt ve jmenované normě. Před jejich praktickou aplikací je však třeba připomenout další omezující podmínku. Norma [15] slouží jako podklad pro návrh a používání normalizovaných clon pro měření průtoku ve zcela zaplněném průřezu potrubí o vnitřním průměru  $50 \text{ mm} < D < 1000 \text{ mm}$ . Přesto jsou na základě stejných výpočtových vztahů navrhovány a vyráběny clonové tratě pro menší vnitřní průměry potrubí. Příkladem je trať využitá k měření průtoku páry v následující kapitole.



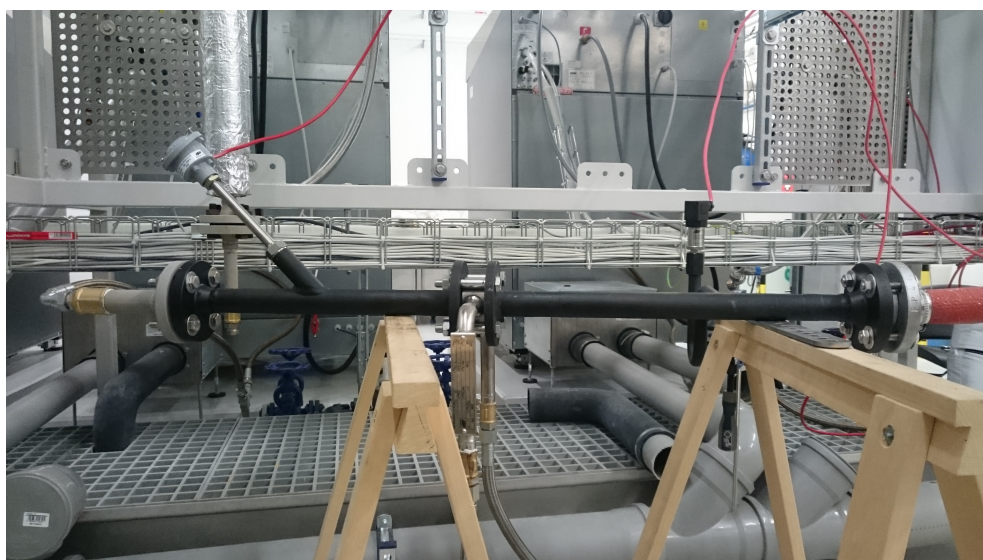
## 3. Experimentální měření průtoku topné páry

Měření průtoku páry clonovou trati, které je součástí zadání této práce bylo provedeno v dubnu 2017 v Laboratoři energeticky náročných procesů. Příprava měření i samotný průběh bude stručně popsán v této kapitole.

### 3.1. Příprava měření

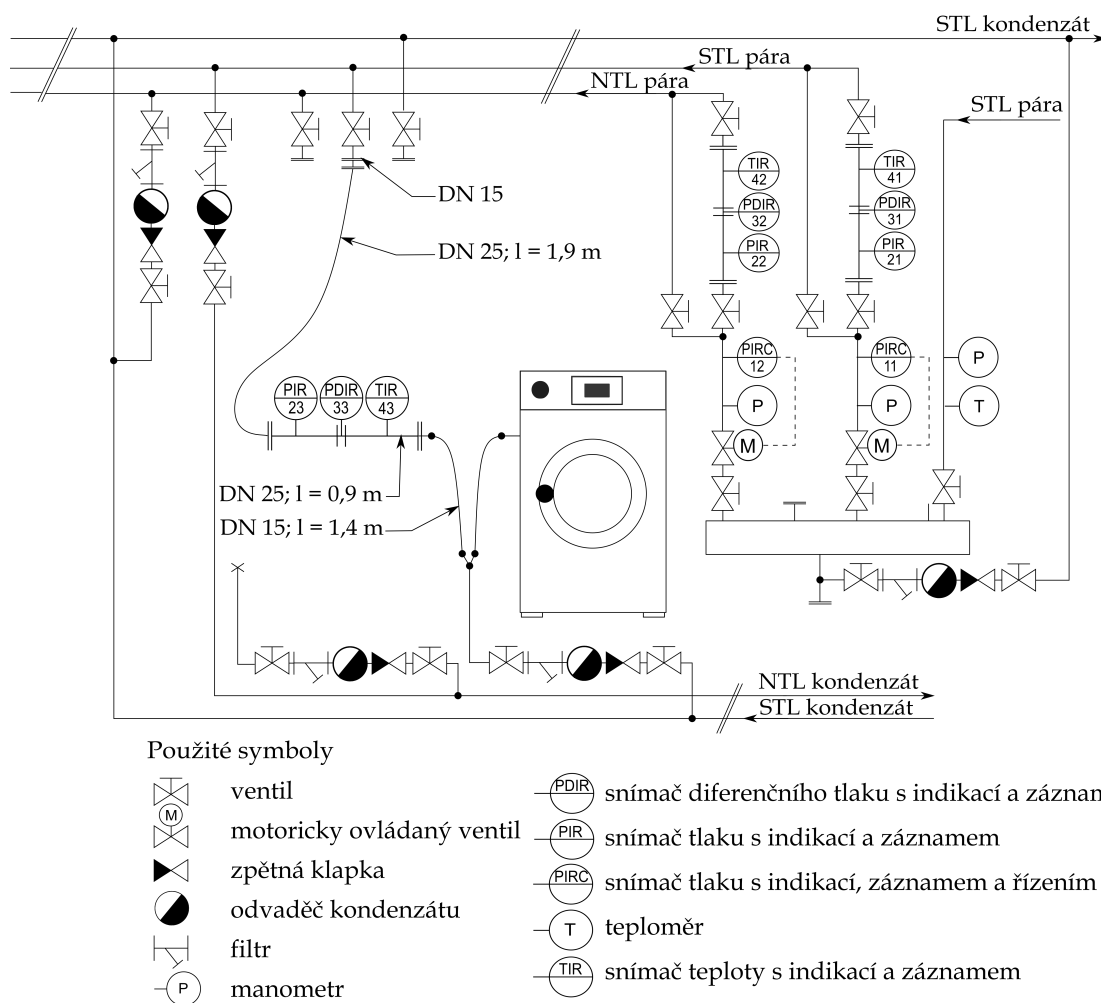
Pro potřebné měření byla zvolena clonová trať s DN25 od společnosti JSP, s.r.o. Před samotným měřením byla trať upravena odstraněním kondenzačních nádob v místě odběrů diferenčního tlaku. Došlo tak z důvodu údajné nepřesnosti již zabudované clonové trati v laboratoři právě kvůli kondenzačním nádobám.

Během přípravy měřicí sestavy bylo nutné napojit clonovou trať (DN25) na rozvody středotlaké páry (DN15) a ke spotřebiči (DN15). K tomuto účelu bylo využito hadice, tvarovek a fitinek dostupných v laboratoři. Clonová trať byla umístěna do vodorovné polohy. Posléze byla sestava doplněna o potřebná měřidla. Odporové teplotní čidlo bylo umístěno do návarku pod úhlem  $45^\circ$  proti směru proudění. Snímač absolutního tlaku byl zapojen přes kondenzační smyčku vyvedenou z trati před clonou. Při instalaci snímače diferenčního tlaku bylo nutné naplnit přívodní hadice (impulsní vedení) vodou, která chrání snímač před vlivem teploty měřené tekutiny. Dále byla do okruhu puštěna pára, aby byla ověřena těsnost spojů, aby se celý systém prohřál, a aby se zcela zaplnilo impulsní vedení k snímači tlakové difference kondenzátem. Fotografie měřicí trati je uvedena na obrázku 3.1, P&I schéma části parního okruhu je níže na obrázku 3.2.



Obr. 3.1: Clonová trať s měřidly

Poté došlo na připojení snímačů do měřicí karty a nastavení vhodného přepočtu veličin v počítači. Schéma zapojení proudové smyčky je uvedeno na obrázku 3.4. Při zapojení snímače tlaku a snímače diferenčního tlaku byl navíc použit rezistor o odporu  $R=100\ \Omega$ .



Obr. 3.2: P&I schéma části parního okruhu [17]

U snímače diferenčního tlaku bylo navíc nutné nastavit měřicí rozsah a provést vynulování manuálně přímo na snímači. Následně byly vybrány kanály s požadovanými měřenými veličinami (včetně podmínek v laboratorii a údajů z původní clonové trati) a nastaveno ukládání hodnot do nově vzniklé databáze. Parametry použitých měřidel (obr. 3.3) jsou uvedeny v následujících tabulkách 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4.

Informace o použitém odporovém snímači teploty T10013 bohužel nebyly nalezeny. Data uvedená v tabulce 3.4 byla zjištěna ze štítku snímače a z dokumentace k novějšímu typu odporového snímače teploty T1070.

## 3.2. Průběh měření

Po dokončení všech přípravných prací bylo zahájeno samotné měření. Aby bylo možné měřit průtok páry, musel být zajištěn odběr páry. K tomuto účelu byla vybrána jedna z praček instalovaných v laboratorii. Pračka bohužel nemá konstantní odběr páry, jak by to bylo pro měření průtoku pomocí clony vhodné. Z tohoto důvodu byl alespoň zvolen program s nejvyšší teplotou ohřevu a tím i nejdelším odběrem - „kuchyně“ (60 - 90 -

<sup>1</sup>Odchylka charakteristiky dle IEC 60770 - nelinearita, hystereze, opakovatelnost.

Tab. 3.1: Clonová měřicí trať s koutovými odběry [18]

Výrobce	JSP, s.r.o.
Typ	CMT-B 99(DN25) 3 L10/8 P2/2 3 1 3 01 1 N
Výrobní číslo	12028157
Jmenovitá světlost	DN 25
Jmenovitý tlak	PN 16
Odběry tlaku	bodové
Materiál	clona 1.4541, potrubí P235GH
Přímá délka před/za clonou	10D/8D
Průměr potrubí	25,0 mm (při 20 °C)
Průměr otvoru clony	14,065 mm (při 20 °C)
Průtok	$q_{min}=10,0$ kg/h, $q_{max}=115,0$ kg/h
Provozní podmínky	$T=158,92$ °C, $p=5,0$ bar g, $\Delta p=16,0$ kPa

Tab. 3.2: Snímač diferenčního tlaku [19]

Výrobce	BD SENSORS s.r.o.
Typ	AX2-XMD (340-2001-A0-I-1-AK0-N56-1-1-1-000)
Výrobní číslo	1786346
Rozsah	0 až 2 bar
Výstupní signál	4 až 20 mA/2 vodiče
Přesnost signálu <sup>1</sup>	$\leq \pm 0,1$ % z rozsahu, (přenasazení rozsahu $\leq 5:1$ ) $\leq \pm [0,1+0,015 \times \text{přenasazení}]$ z rozsahu % z rozsahu, (přenasazení rozsahu $> 5:1$ )
Rychlost měření	3,5 měření/s
Provozní podmínky	médium -40 až 85 °C, okolí -20 až 50 °C
Pozice na obr. 3.2	33

60) °C. Dále bylo rozhodnuto o spuštění praní naprázdno kvůli snazšímu výpočtu energetické bilance, která by měla poskytnout srovnávací hodnotu spotřeby topné páry. Další podstatnou odchylku od ideálních podmínek měření způsobil zdroj samotné páry. Kotel byl v době měření vypnut, takže množství a parametry páry použité pro měření byly omezeny. Konstatní tlak topné páry byl udržován pomocí počítačově ovládaného škrťacího ventilu.

Celkově bylo provedeno měření třech pracích cyklů. Zápis z měření je uveden v příloze A. Při prvním pracím cyklu byl relativní tlak páry udržován na hodnotě 3 bar g. Přitom bylo zjištěno, že nastavený měřicí rozsah 0 až 50 kPa na snímači diferenčního tlaku je zbytečně velký. Po skončení cyklu byl proto přenasazen na hodnotu 0 až 20 kPa. Dále byl zvýšen tlak topné páry na 4 bar g. Poslední měřený prací cyklus byl proveden za stejného nastavení, ovšem tlak páry postupně klesal.

Tab. 3.3: Snímač statického tlaku [20]

Výrobce	JSP, s.r.o.
Typ	D2610 A216 ME2 1 CR
Výrobní číslo	10093360
Rozsah	(0-160) kPa až (0-1,6) MPa
Výstupní signál	4 až 20 mA/2 vodiče
Maximální měřená chyba	$\leq \pm 0,2 \%$ z rozsahu
Nelinearita	$\leq \pm 0,1 \%$ z rozsahu
Hystereze	$\leq \pm 0,1 \%$ z rozsahu
Rychlost měření	4 měření/s
Pozice na obr. 3.2	23

Tab. 3.4: Odporový snímač teploty s jímkou [21]

Výrobce	JSP, s.r.o.
Typ	T10013 06F1 110 J10 N1 H1 P1
Výrobní číslo	11103976
Rozsah	-50 až 400 °C
Výstupní signál	4 až 20 mA/4 vodiče
Třída přesnosti	B dle ČSN EN 60751
Pozice na obr. 3.2	43

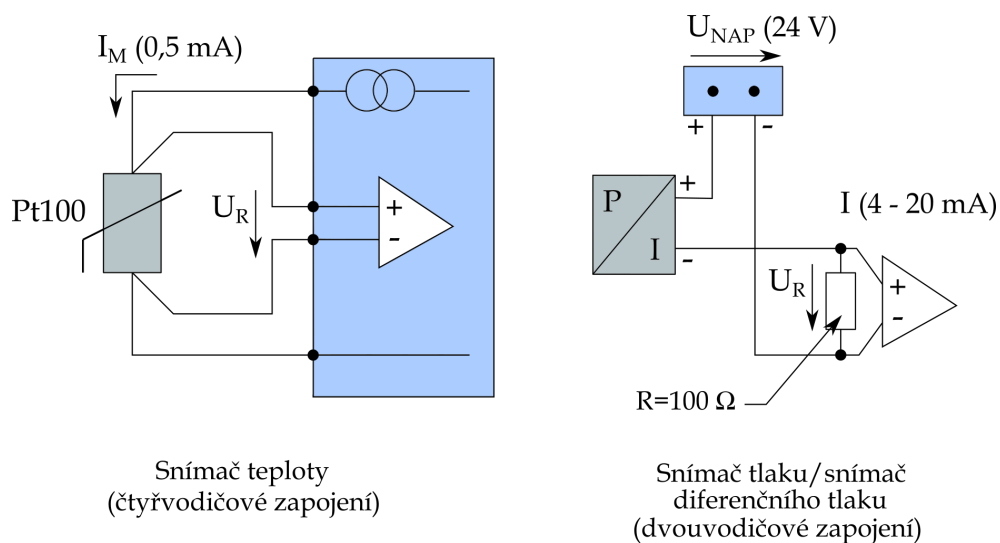


(i) Snímač diferenčního tlaku [19]

(ii) Snímač statického tlaku [20]

(iii) Odporový snímač teploty s jímkou

Obr. 3.3: Použitá měřidla

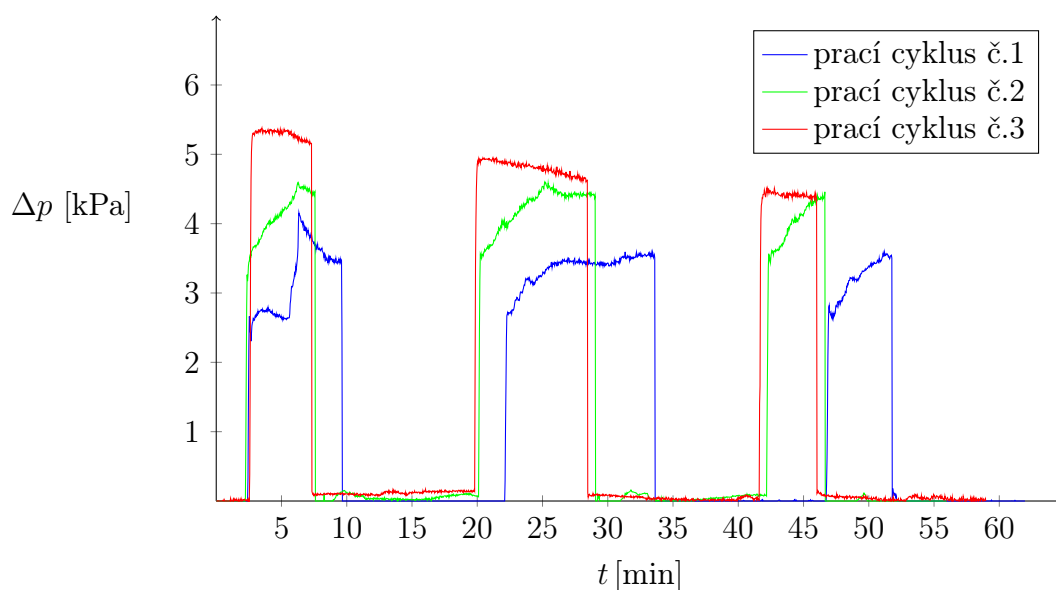


Obr. 3.4: Schematické znázornění zapojení použitých snímačů

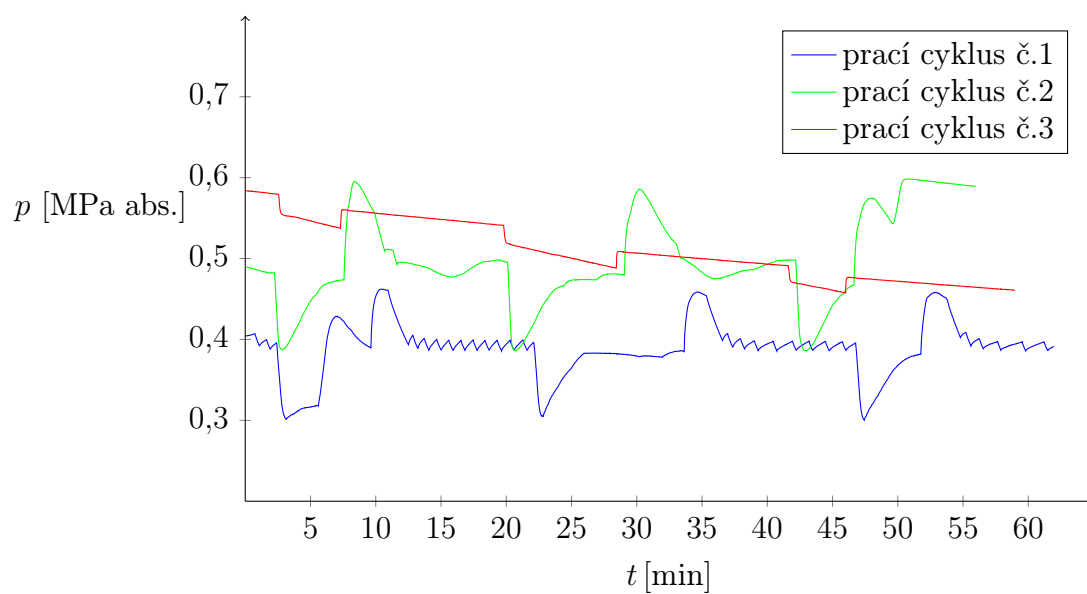
### 3.3. Naměřená data

Po skončení měření byla naměřená data exportována do souboru s příponou CSV s krokem záznamu 0,1 s. Tato data jsou určena k dalšímu zpracování popsaného v následující kapitole. Mezi měřeními daty byly zaznamenány i podmínky v laboratoři. Průměrná teplota vzduchu během doby měření činila  $21,9^\circ \text{C}$ , průměrný tlak byl  $99,4 \text{ kPa}$  a relativní vlhkost vzduchu činila  $14,7 \% \text{ r. v.}$

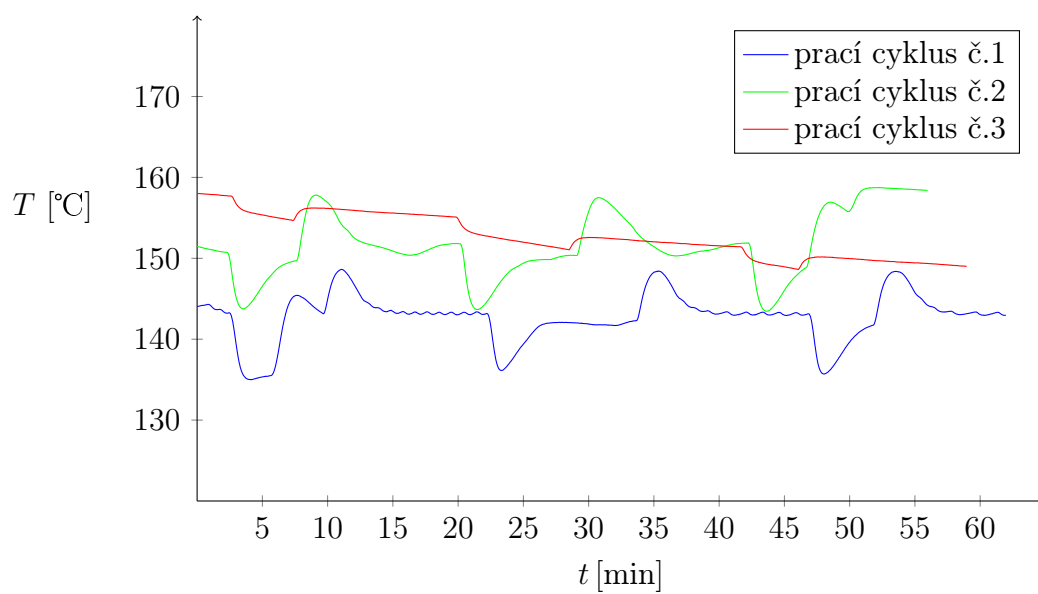
Na uvedených grafech 3.5, 3.6 a 3.7 jsou znázorněny naměřené průběhy diferenčního tlaku, statického tlaku a teploty páry. Diferenční tlak vystihuje svým tvarem průtok páry. Na průběhu statického tlaku lze pozorovat prudký pokles tlaku v okamžiku začátku odběru. Tato změna je důsledkem regulace tlaku ventilem, jejíž rychlost není vysoká. Naměřená teplota poté kopíruje změny statického tlaku.



Obr. 3.5: Průběh diferenčního tlaku páry pro měřené prací cykly



Obr. 3.6: Průběh statického tlaku páry pro měřené prací cykly



Obr. 3.7: Průběh teploty páry pro měřené prací cykly

## 4. Zpracování naměřených dat

Z naměřených dat jsou vypočítány hodnoty okamžitého hmotnostního průtoku a kumulovaný průtok páry. Ten je dále porovnán s jednoduchou energetickou bilancí ohřevu vody v pračce a průtokem naměřeným původní clonovou tratí v laboratoři. Výpočet aktuálního průtoku ve formě hmotnostního průtoku je zvolen z důvodu stlačitelnosti páry. Při změně tlaku a teploty dochází u plynné fáze ke změně objemu tekutiny, nikoli však hmotnosti. Pro měření průtoku tak má lepší vypovídající hodnotu hmotnostní průtok. V případě objemového průtoku je možné zvolit také přepočet na normální podmínky ( $p = 101,315 \text{ kPa}$ ,  $T = 20 \text{ °C}$ ). V dalším kroku je stanovena nejistota průtoku na základě postupu uvedeného v normě ČSN EN ISO 5167 a podrobnějším postupem přihlížejícím ke všem vstupním veličinám a korelacím mezi nimi. Tento přístup byl zvolen k porovnání se zjednodušením doporučeným normou. Názorný výpočet okamžitého hmotnostního průtoku a jeho nejistoty je uveden v příloze B.

### 4.1. Výpočet průtoku páry

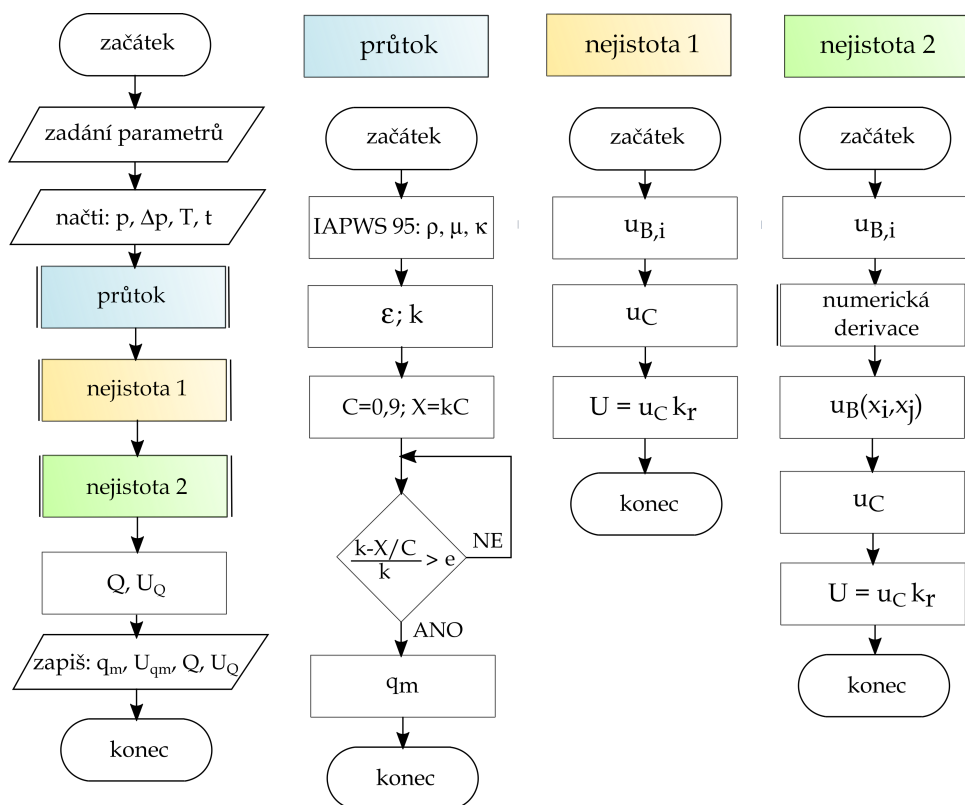
Při měření průtoku vodní páry clonou jsou známy geometrické parametry clony a potrubí, změřené hodnoty absolutního a diferenčního tlaku, teplota páry a z nich plynoucí fyzikální vlastnosti páry. Ve vztahu pro výpočet průtoku však vystupuje součinitel průtoku, který je závislý na Reynoldsově číslu a tedy průtoku. Úloha se tak nedá řešit přímo a je nutné použít iterační výpočet. K tomuto účelu je využit numerický výpočet v programu Spyder, který využívá programovací jazyk Python 2.7.

Postup výpočtu je schématicky znázorněn na obrázku 4.1. Vstupní data jsou rozdělena na geometrické parametry clonové trati a příslušné materiálové vlastnosti zadané přímo, a na naměřené hodnoty teploty, absolutního a diferenčního tlaku, které jsou načteny ze souboru. Pro každou hodnotu diferenčního tlaku je poté vypočítán aktuální hmotnostní průtok.

Vstupy pro funkci počítající hmotnostní průtok jsou následující:

- vnitřní průměr potrubí  $D$ ,
- průměr otvoru clony  $d$ ,
- součinitel délkové roztažnosti  $\alpha_p$  pro materiál potrubí,
- součinitel délkové roztažnosti  $\alpha_c$  pro materiál clony,
- podíly vzdáleností tlakového odběru od stěny clonového kotouče  $L_1, L_2$ ,
- teplota páry  $T$ ,
- absolutní tlak páry  $p$ ,
- diferenční tlak páry  $\Delta p$ .

Základní rozměry clonové trati jsou známy od výrobce a byly uvedeny v tabulce 3.1. Vnitřní průměr potrubí a průměr otvoru clony jsou známy pro teplotu  $20 \text{ °C}$ . Měřena je však sytá pára o vyšším tlaku a teplotě. Z tohoto důvodu je nutné uvažovat změnu rozměrů způsobenou tepelnou roztažností materiálu. Změna vlivem působení tlaku je zanedbána. Rozměry je proto nutno přepočítat pro provozní podmínky podle vztahu (4.1). Protože je měření průtoku provedeno na normalizované cloně s bodovými odběry, jsou podíly vzdáleností odběrů tlaků od clony nulové. Délková roztažnost je tak uplatněna pouze u průměru potrubí a průměru otvoru clonového kotouče. Hodnota délkové roztažnosti pro



Obr. 4.1: Vývojový diagram výpočtu

materiál potrubí a 150 °C je  $\alpha_p = 12,9 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  [22], délková roztažnost materiálu clony pro 150 °C činí  $\alpha_c = 17,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  (tabulka 10-46 [23]).

$$x_T = x_{20^\circ\text{C}}(1 + \alpha(T - T_{20^\circ\text{C}})) \quad (4.1)$$

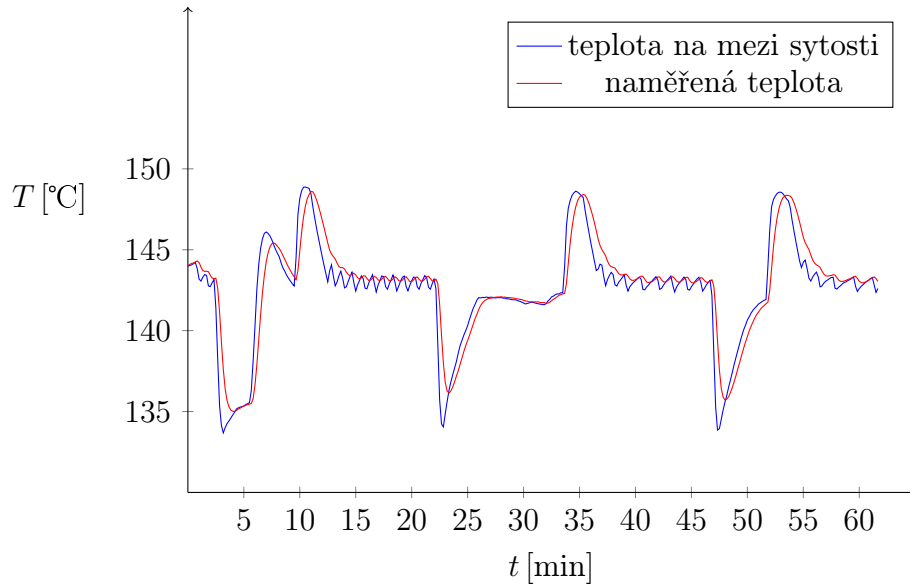
Kde  $x_T$  je délkový rozměr po korekci [mm],  $x_{20^\circ\text{C}}$  je délkový rozměr při 20 °C,  $\alpha$  je součinitel délkové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ],  $T$  je provozní teplota [°C] a  $T_{20^\circ\text{C}}$  je referenční teplota [°C].

Naměřená data jsou exportována do výpočtového algoritmu a upravena pro další výpočet. Jedná se zejména o převod jednotek tlaku a přepsání záporných hodnot diferenčního tlaku. Tyto hodnoty vznikly při měření v dobách, kdy nebyl odběr páry a snímač byl ovlivněn vyšším množstvím kondenzátu v okruhu. Ve vztahu pro hmotnostní průtok je tlaková difference počítána pod odmocninou, což v případě záporných hodnot nelze vyjádřit v reálném oboru.

Vlastnosti páry (hustota, dynamická viskozita a izentropický exponent) jsou určovány pomocí parních tabulek dostupných v jazyce python IAPWS 95 [24]. Tyto tabulky jsou založeny na základě standardů pro výpočet vlastností vody a vodní páry přijatých IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam) [25]. Vstupní hodnotou pro určení vlastností páry je absolutní tlak před clonou  $p_1$  a předpoklad syté páry (suchost páry  $x=1$ ). Není zde uplatňována naměřená teplota páry, protože její měření je prováděno za clonou, kde dochází k poklesu teploty. Měřidlem je navíc odporový snímač teploty umístěný v jímce. Jímka jej chrání před vysokou teplotou měřeného média, ale znamená také jisté zpoždění v měření teploty. V některých okamžicích tak teplota ukazuje přítomnost mokré páry, což znehodnocuje další výpočet průtoku. Jako důkaz blízkosti



naměřené teploty a teploty rosného bodu pro absolutní tlak je na obrázku 4.2 uveden graf vývoje těchto teplot v rámci 1. měřeného pracího cyklu.



Obr. 4.2: Graf pro porovnání naměřené teploty a teploty na mezi sytosti pro naměřený absolutní tlak

Následujícím krokem výpočtu je vyčíslení součinitele expanze a vyjádření neznámých z rovnice (2.8), kde je místo hmotnostního průtoku dosazen vztah pro Reynoldsovo číslo (2.11). Dále je nutné přistoupit k vlastnímu iteračnímu výpočtu vzniklé lineární rovnice (4.2). S počátečním odhadem součinitele průtoku a zvolenou přesností iterace je po  $n$  krocích vyjádřeno Reynoldsovo číslo společně s reálnou hodnotou součinitele průtoku. Na základě těchto dat je poté vyčíslen hmotnostní průtok.

$$\frac{Re_D}{C} = \frac{\epsilon d^2 \sqrt{2\Delta p \rho}}{\mu D \sqrt{1 - \beta^4}} = konst. \quad (4.2)$$

Na obrázku 4.3 je znázorněn průtok při prvním měření. Je možné si všimnout záchvěvů nižších hodnot průtoku po druhém a třetím ohřevu. V těchto místech byly naměřeny nepatrné hodnoty diferenčního tlaku na hranici přesnosti snímače. Tyto průtoky poté negativně zasahují do výpočtu nejistoty průtoku v absolutních pojmech. Proto bylo přistoupeno k přiřazení nulové hodnoty průtokům v daných časech.

Kumulovaný průtok je stanoven na závěr výpočtu sumací jednotlivých příspěvků hmotnostního průtoku v čase. Pro 1. měření vychází spotřeba páry na přibližně 16,3 kg.

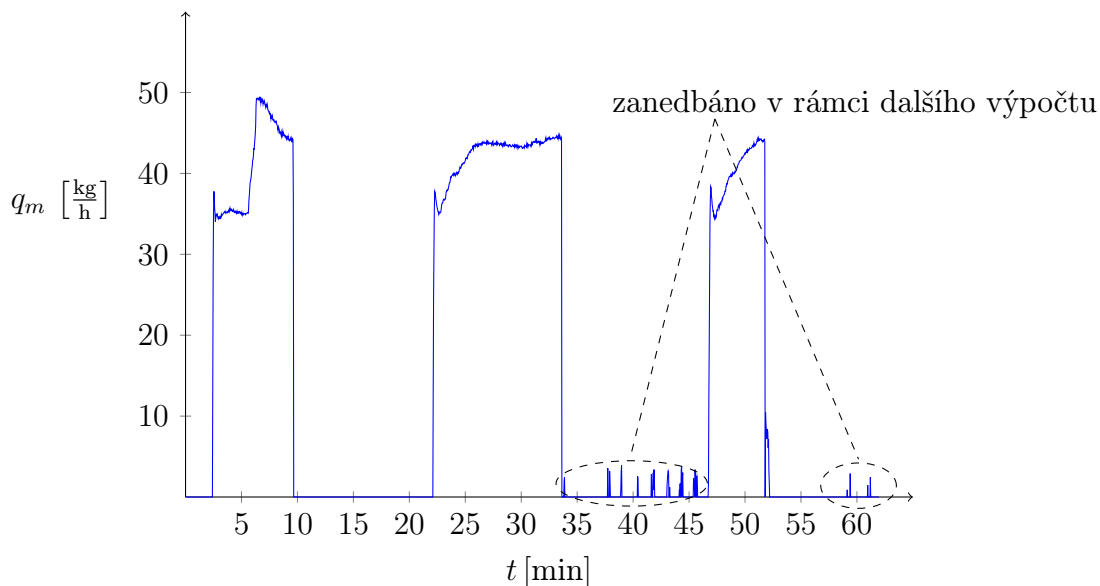
$$m = \sum_{i=1}^n q_{m,i} \Delta t_i \quad (4.3)$$

Kde  $q_{m,i}$  je okamžitý hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ] a  $\Delta t$  je perioda zápisu hodnot [s].

Hodnota kumulovaného průtoku je dále využita ke stanovení průměrné hodnoty hmotnostního průtoku pracího cyklu, která v případě 1. měření dosahuje hodnoty  $15,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

$$\bar{q}_m = \frac{3600m}{n_{q_{m,i}} \Delta t} \quad (4.4)$$

Kde  $m$  je kumulovaný průtok [kg],  $n_{q_{m,i}}$  je počet hodnot okamžitého průtoku [-] a  $\Delta t$  je perioda zápisu hodnot [s].



Obr. 4.3: Graf hmotnostního průtoku měření č. 1

## 4.2. Výpočet nejistoty měření průtoku páry

Experimentální měření, které bylo provedeno pro další vyhodnocení nejistot, neproběhlo vždy za stejných podmínek, proto nelze vyjádřit nejistotu typu A, ale je posuzována pouze nejistota typu B. Ta je vypočítána dvěma postupy uvedenými v následujících podkapitolách. Jedná se o výpočet doporučený normou ČSN EN ISO 5167-1 (způsob 1) a výpočet podrobnější, zvolený podle normy ČSN EN ISO 5168 (způsob 2). Před samotným výpočtem je však třeba si shrnout jednotlivé zdroje nejistot. Pro výpočet hmotnostního průtoku páry je nutné zohlednit veličiny, které vstupují do použitých výpočtových vztahů:

- absolutní tlak páry  $p$ ,
- diferenční tlak páry  $\Delta p$ ,
- teplota páry  $T$ ,
- hustota páry  $\rho$ ,
- dynamická viskozita páry  $\mu$ ,
- izentropický exponent  $\kappa$ ,
- vnitřní průměr potrubí  $D$ ,
- průměr otvoru clony  $d$ ,
- součinitel délkové roztažnosti  $\alpha$ ,
- součinitel délkové roztažnosti  $\alpha$ ,
- součinitel expanze  $\epsilon$ ,
- součinitel průtoku  $C$ .

Pro tyto veličiny je poté nutné dohledat informace o přesnosti měřidel, o přesnosti použitých výpočtových vztahů nebo o odečtu dat z tabulek. Určení příslušných nejistot je uvedeno dále.

*Nejistota absolutního tlaku* je dána údaji o přesnosti uvedenými výrobcem snímače tlaku, viz. tabulka 3.3. Maximální měřená chyba, nelinearita a hystereze jsou vztaženy na nastavený rozsah měřidla. V případě provedeného měření byl tento rozsah nastaven na hodnotu 0 až 10 bar. Vztah pro výpočet nejistoty typu B je uveden níže.

$$u_B(p) = \sqrt{\left(\frac{0,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2} \frac{10}{1000} [\text{MPa}] \quad (4.5)$$

*Nejistota diferenčního tlaku* je stanovena obdobně jako nejistota absolutního tlaku. Přesnost snímače je opět závislá na měřicím rozsahu, resp. přenastavení rozsahu (tab. 3.2). V prvním měření byl rozsah nastaven na 0 až 50 kPa, ve druhém a třetím měření na 0 až 20 kPa. Podle technické dokumentace je nejistota určena jako (4.6) v prvním případě a (4.7) ve zbývajících dvou případech.

$$u_B(\Delta p) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} 50 \cdot 10 [\text{Pa}] \quad (4.6)$$

$$u_B(\Delta p) = \frac{0,1 + 0,15 \cdot 200/20}{\sqrt{3}} 20 \cdot 10 [\text{Pa}] \quad (4.7)$$

*Nejistota teploty* je dána třídou přesnosti, do které je snímač zařazen. Třídě přesnosti B dle ČSN EN 60751 odpovídá vztah  $\pm(0,30 + 0,005 T) ^\circ\text{C}$  [26].

$$u_B(T) = \frac{0,30 + 0,005 T}{\sqrt{3}} [^\circ\text{C}] \quad (4.8)$$

*Nejistota hustoty* je následkem metody výpočtu užití v parních tabulkách. Tato přesnost je zjištěna z dokumentace pro parní tabulky IAPWS 95. Pro oblast syté páry je její hodnota 0,03 %. [25]

$$u_B(\rho) = \frac{0,03}{2} \frac{\rho}{100} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (4.9)$$

*Nejistota dynamické viskozity* je rovněž způsobena výpočtovou metodou parních tabulek. Podle stejného zdroje se jedná přibližně o 2 %. [25]

$$u_B(\mu) = \frac{2}{2} \frac{\mu}{100} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (4.10)$$

*Nejistota izentropického exponentu* je podle [25] přibližně 2 %.

$$u_B(\kappa) = \frac{2}{2} \frac{\kappa}{100} [-] \quad (4.11)$$

*Nejistota vnitřního průměru potrubí* je dána jako 0,1 mm, resp. 0,4 % podle výpočtové dokumentace k clonové trati.

$$u_B(D) = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \frac{1}{1000} [\text{m}] \quad (4.12)$$

*Nejistota průměru otvoru clony* odpovídá hodnotě 0,01 mm, tedy 0,07 % taktéž podle výpočtové dokumentace k clonové trati.

$$u_B(d) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \frac{1}{1000} [\text{m}] \quad (4.13)$$

*Nejistota součinitele délkové roztažnosti* pro vyčíslení z tabulek je odhadnuta na 5 % podle vypočítaných příkladů v [6]. Nejistota součinitele délkové roztažnosti pro materiál potrubí je vyjádřena podle vztahu (4.14). Nejistotu součinitele délkové roztažnosti materiálu clonového kotouče dává rovnice (4.15).

$$u_B(\alpha_p) = \frac{5}{\sqrt{3}} \frac{\alpha_p}{100} [\text{K}^{-1}] \quad (4.14)$$

$$u_B(\alpha_c) = \frac{5}{\sqrt{3}} \frac{\alpha_c}{100} [\text{K}^{-1}] \quad (4.15)$$

*Nejistota součinitele expanze a součinitele průtoku* je vypočítána na základě vztahů podle normy ČSN EN ISO 5167-1 uvedených v podkapitole 2.2.3.

#### 4.2.1. Nejistota hmotnostního průtoku, způsob 1

Nejistotu hmotnostního průtoku tekutiny normalizovanou clonou lze určit podle ČSN EN ISO 5167 ze vztahu (2.16). Uvedený vzorec je dán pro výpočet relativní nejistoty hmotnostního průtoku na základě veličin vstupujících do vztahu (2.8) pro hmotnostní průtok.

Základem pro výpočet jsou tedy:

- nejistota diferenčního tlaku,
- nejistota hustoty páry,
- nejistota vnitřního průměru potrubí,
- nejistota průměru otvoru clony,
- nejistota součinitele expanze,
- nejistota součinitele průtoku.

Vyčíslení nejistoty průtoku je potom jen dosazení relativních hodnot jednotlivých nejistot do vzorce. Výsledná hodnota je poté navýšena koeficientem rozšíření,  $k = 2$  na úroveň spolehlivosti 95 %.

#### 4.2.2. Nejistota hmotnostního průtoku, způsob 2

Hlavním podkladem pro podrobnější výpočet nejistoty je norma ČSN ISO 5168 [6] shrnující postupy pro vyhodnocení nejistot při měření průtoku tekutin. Nejistota hmotnostního průtoku páry je zde odvozena ze všech zdrojů nejistot uvedených na začátku podkapitoly 4.2. Jednotlivé nejistoty jsou vyčísleny v absolutních pojmech kvůli korektnosti výpočtu. Dále je postupováno v souladu se zákonem šíření nejistot. Je tedy nutné vyčíslit citlivostní koeficienty, zvážit možné korelace mezi veličinami a případně určit kovariance.

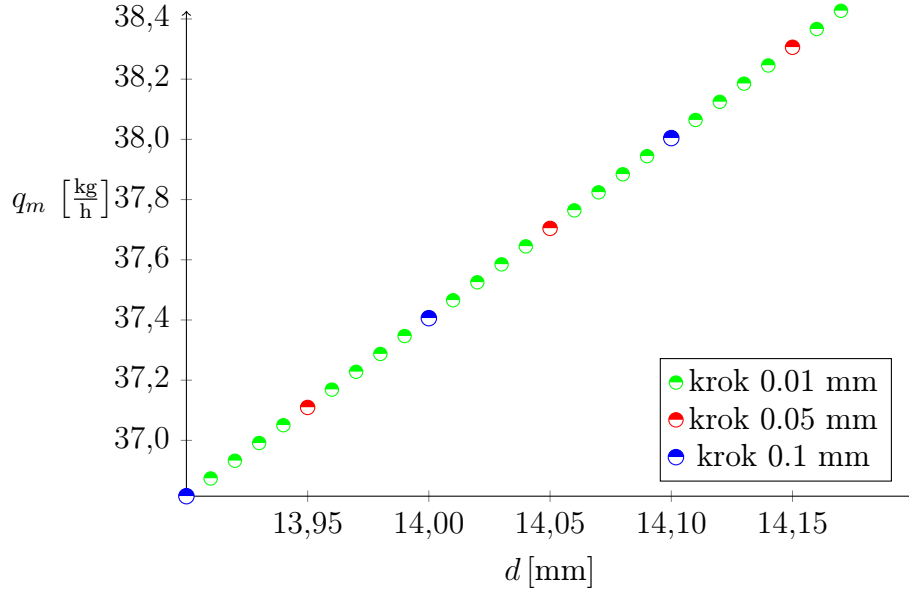
Citlivostní koeficienty mají být vyjádřeny jako parciální derivace hmotnostního průtoku podle daného zdroje nejistoty. Vzhledem ke složitosti použitých výpočetních vztahů je derivace provedena numericky (4.16). Je tedy vyjádřen přírůstek průtoku v závislosti na změně vstupní veličiny. Výpočet numerické derivace je proveden pomocí první centrální difference (4.17).

$$A_i = \frac{\partial q_m}{\partial i} \approx \frac{\Delta q_m}{\Delta i} \quad (4.16)$$

$$A_i = \frac{q_m(i+h) - q_m(i-h)}{2h} \quad (4.17)$$

Kde  $q_m$  je hodnota hmotnostního průtoku,  $i$  je vstupní veličina a  $h$  je změna veličiny  $i$ .

K dalšímu výpočtu numerické derivace je tedy nutné zvolit vhodně velikost změny veličiny, která by vystihovala změnu průtoku. Tento krok  $h$  byl určen na základě grafického znázornění závislosti průtoku na dané veličině. Jelikož se jednalo vesměs o lineární závislosti, není třeba použití složitější metody. Příkladem je obrázek 4.4. Použité kroky jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obr. 4.4: Graf závislosti hmotnostního průtoku na změně průměru  $d$

Tab. 4.1: Zvolené hodnoty kroku pro výpočet numerické derivace

$h_p$	[MPa]	$1 \cdot 10^{-4}$	$h_D$	[m]	$1 \cdot 10^{-5}$
$h_{\Delta p}$	[Pa]	1,0	$h_d$	[m]	$1 \cdot 10^{-5}$
$h_T$	[°C]	1,0	$h_{\alpha_p}$	[K <sup>-1</sup> ]	$1 \cdot 10^{-7}$
$h_\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	0,01	$h_{\alpha_c}$	[K <sup>-1</sup> ]	$1 \cdot 10^{-7}$
$h_\mu$	[Pa·s]	$1 \cdot 10^{-7}$	$h_\epsilon$	[-]	0,001
$h_\kappa$	[-]	0,001	$h_C$	[-]	0,001

Velikost citlivostních koeficientů se různí pro každý hmotnostní průtok, řádově však vycházejí stejně. Příkladem hodnot citlivostních koeficientů je tabulka 4.2. Díky citlivostní analýze lze následně určit, který zdroj nejistoty je pro celkovou nejistotu měření významnější a který by bylo možno případně zanedbat.

Další analýza se týká korelovaných veličin. Měřené veličiny by neměly být vzájemně ovlivněny kvůli použité metodě měření. Nejistoty součinitelů expanze a průtoku jsou určovány ze vztahů, které v sobě již zahrnují možný vliv veličin, ze kterých jsou počítány. Výpočet kovariance tak není nutný. U hodnot průměrů  $D$  a  $d$  není známa žádná výrazná závislost. Součinitelé délkové roztažnosti jsou odečtení z tabulek vůči přibližné hodnotě

Tab. 4.2: Citlivostní koeficienty pro hodnotu průtoku ve 30. minutě 1. měření

$A_p$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{MPa}^{-1}]$	0,0149	$A_D$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$	0,1088
$A_{\Delta p}$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{Pa}^{-1}]$	$1,7\cdot 10^{-6}$	$A_d$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$	1,8975
$A_T$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{°C}^{-1}]$	$4,2\cdot 10^{-7}$	$A_{\alpha_p}$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{°C}^{-1}]$	0,7047
$A_\rho$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	0,0029	$A_{\alpha_c}$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{°C}^{-1}]$	3,2444
$A_\mu$	$[\text{kg}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}]$	6,7569	$A_\epsilon$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,0120
$A_\kappa$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	$2,5\cdot 10^{-5}$	$A_C$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	0,0193

teploty páry. Zde je výpočet kovariance zanedbán, protože odečet z tabulek není přesný. Při výpočtu kovariance by navíc vyšla kladná hodnota, což by zvětšilo celkovou nejistotu, případný vliv je tak zahrnut do vyšší hodnoty zvolené přesnosti. Zbývající parametry páry jsou odečítány z tabulek podle hodnoty statického tlaku. Zde je provedeno stanovení kovariancí.

Kovariance tlaku a vlastností páry se vypočítá ze vztahu (1.19), kde korelační koeficient je volen 1 nebo -1 podle vzájemného chování veličin (např. s rostoucím tlakem roste hustota,  $r(p, \rho)=1$ ).

$$u_B(p, \rho) = 1u_B(p) u_B(\rho) \quad (4.18)$$

$$u_B(p, \mu) = -1u_B(p) u_B(\mu) \quad (4.19)$$

$$u_B(p, \kappa) = 1u_B(p) u_B(\kappa) \quad (4.20)$$

Celková standartní nejistota hmotnostního průtoku se spočítá podle vztahu (4.21). Následně je rozšířena koeficientem rozšíření,  $k=2$ , na 95% interval spolehlivosti.

$$\begin{aligned} u_c(q_m) = & (A_p^2 u_B^2(p) + A_{\Delta p}^2 u_B^2(\Delta p) + A_T^2 u_B^2(T) + A_\rho^2 u_B^2(\rho) + A_\mu^2 u_B^2(\mu) + A_\kappa^2 u_B^2(\kappa) + \\ & + A_D^2 u_B^2(D) + A_d^2 u_B^2(d) + A_{\alpha_p}^2 u_B^2(\alpha_p) + A_{\alpha_c}^2 u_B^2(\alpha_c) + A_\epsilon^2 u_B^2(\epsilon) + \\ & + A_C^2 u_B^2(C) + 2(A_p A_\rho u_{p,\rho} + A_p A_\mu u_{p,\mu} + A_p A_\kappa u_{p,\kappa}))^{0,5} \end{aligned} \quad (4.21)$$

### 4.2.3. Nejistota kumulovaného průtoku

Protože je kumulovaný průtok určován součtem příspěvků od jednotlivých hmotnostních průtoků, je jeho nejistota opět odvozena za pomoci zákona šíření nejistot. Mezi jednotlivými průtoky není uvažována žádná závislost, proto lze nejistotu vyjádřit následovně:

$$u_B(m) = \sum_{i=1}^n \left( A_{q_{m,i}}^2 u_B^2(q_{m,i}) \right)^{0,5} = \sum_{i=1}^n \left( \Delta t_i^2 u_B^2(q_{m,i}) \right)^{0,5} \quad (4.22)$$

Kde  $\Delta t_i$  vyjadřuje citlivostní koeficient, tedy výsledek parciální derivace kumulovaného průtoku podle okamžitého hmotnostního průtoku,  $u_B^2(q_{m,i})$  je standartní nejistota typu B okamžitého hmotnostního průtoku, v tomto případě odpovídá také kombinované nejistotě hmotnostního průtoku.

#### 4.2.4. Nejistota průměrného hmotnostního průtoku

Průměrná hodnota hmotnostního průtoku je stanovena opět podle zákona šíření nejistot a vychází z rovnice (4.4).

$$u_B(q_m) = \sqrt{\left(\frac{1}{n_{q_m,i} \Delta t}\right)^2 u_B(m)^2} \quad (4.23)$$

Kde  $n_{q_m,i}$  je počet hodnot okamžitého průtoku, ze kterých byl počítán kumulovaný průtok [-],  $\Delta t$  je perioda zápisu hodnot [s] a  $u_B(m)$  je nejistota kumulovaného průtoku [kg].

### 4.3. Spotřeba topné páry dle dalších měřidel

Pro ověření správnosti výpočtu průtoku bylo rozhodnuto stanovení spotřeby páry využitím dat z měřidel instalovaných v laboratoři. Pro porovnání je vybráno 1. měření.

Původní clonová trať poskytuje údaje o spotřebě suché páry [kg]. Stanovení spotřeby 1. pracího cyklu tak proběhlo pouhým odečtem hodnoty spotřeby v době začátku praní od spotřeby na konci. Spotřeba páry podle měření clonovou tratí představuje 56,0 kg.

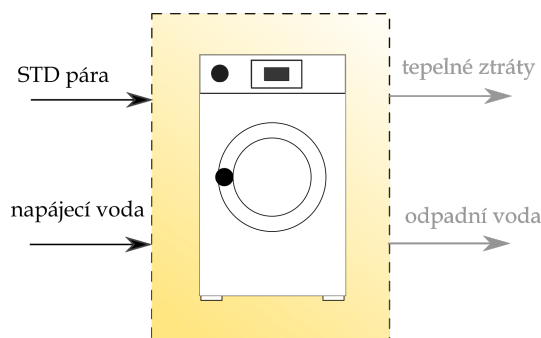
$$m_{para,PCT} = m_{para,1} - m_{para,0} = 47771,4 - 47715,4 = 56,0 \text{ kg} \quad (4.24)$$

Kde  $m_{para,0}$  je hodnota kumulovaného průtoku páry na začátku měření [kg] a  $m_{para,1}$  je hodnota kumulovaného průtoku páry na konci měření [kg].

Dále se nabízí využít data o teplotě uvnitř pračky a vyčíslit jednoduchou energetickou bilanci ohřevu vody v pračce během jednoho pracího cyklu. V následujícím výpočtu nejsou uvažovány tepelné ztráty a odvod tepla odpadní vodou. Řeší se pouze proudy vstupující do pračky, tedy napájecí voda a pára (obr. 4.5). Množství vody bylo naměřeno indukčním průtokoměrem na vstupu do pračky. Teplota uvnitř bubnu byla zaznamenávána čidly v pračce. Protože během cyklu dochází ke třem ohřevům, je nutné sečíst jednotlivé spotřeby.

$$\begin{aligned} m_{para,balance} &= \frac{V_{voda,1} \rho_{voda,1} \bar{c}_{p,voda,1} (T_1 - T_0) + V_{voda,2} \rho_{voda,2} \bar{c}_{p,voda,2} (T_2 - T'_0)}{h_{para}} + \\ &+ \frac{V_{voda,3} \rho_{voda,3} \bar{c}_{p,voda,3} (T_3 - T''_0)}{h_{para}} = \frac{0,066 \cdot 997,9 \cdot 4,18(62 - 21,9)}{2737,7} + \\ &+ \frac{0,057 \cdot 998,0 \cdot 4,18(92 - 20,6) + 0,060 \cdot 998,1 \cdot 4,18(61 - 20,5)}{2737,7} = 12,7 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.25)$$

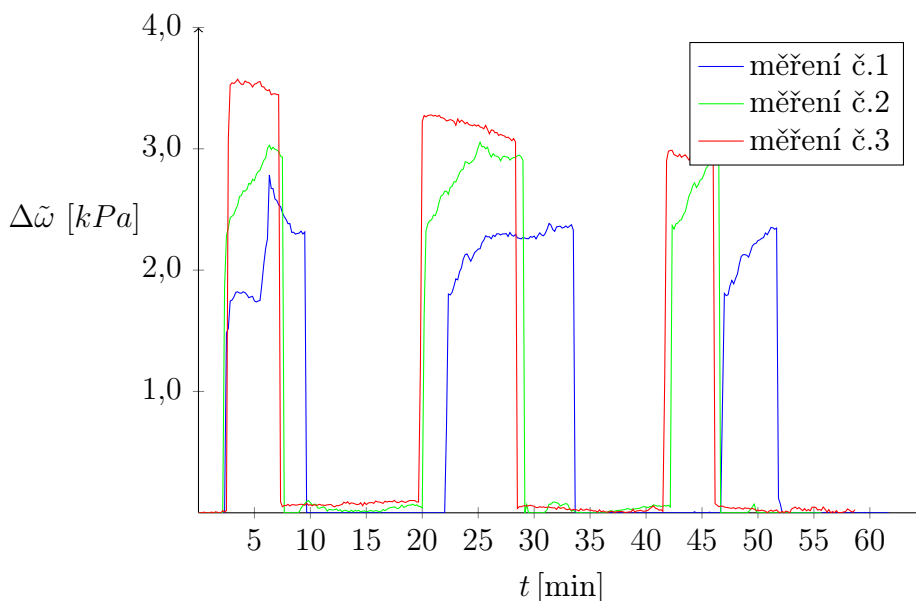
Kde  $V$  vyjadřuje množství vody [ $\text{m}^3$ ],  $\rho$  je hustota vody [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $\bar{c}_{p,voda}$  je měrná tepelná kapacita vody pro střední teplotu ohřevu [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $T_{1/2/3}$  jsou teploty konce ohřevu,  $T_0$  jsou střední teploty napájecí vody [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $h_{para}$  je entalpie páry [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]. Počáteční teplota vody vychází z průměrné hodnoty teploty napájecí vody v dané části cyklu. Zpočátku je teplota voda rovnocenná teplotě v laboratoři, postupně ale s odběrem klesá. Např. na konci 3. měření má  $14,5^{\circ}\text{C}$ . Podle průměrné teploty napájecí vody je určována také hustota. Z uvedené bilance vychází celková spotřeba páry na 12,7 kg.



Obr. 4.5: Bilanční schéma

## 4.4. Tlaková ztráta

V kapitole 2 byl uveden vztah (2.15) pro výpočet tlakové ztráty, kterou vyvolá primární prvek. Na následujícím obrázku 4.6 je graficky uveden průběh tlakové ztráty. Hodnoty jsou nižší než naměřená tlaková difference (viz obr. 3.5), jak bylo zmíněno a jak vyplývá i z obrázku 2.9.



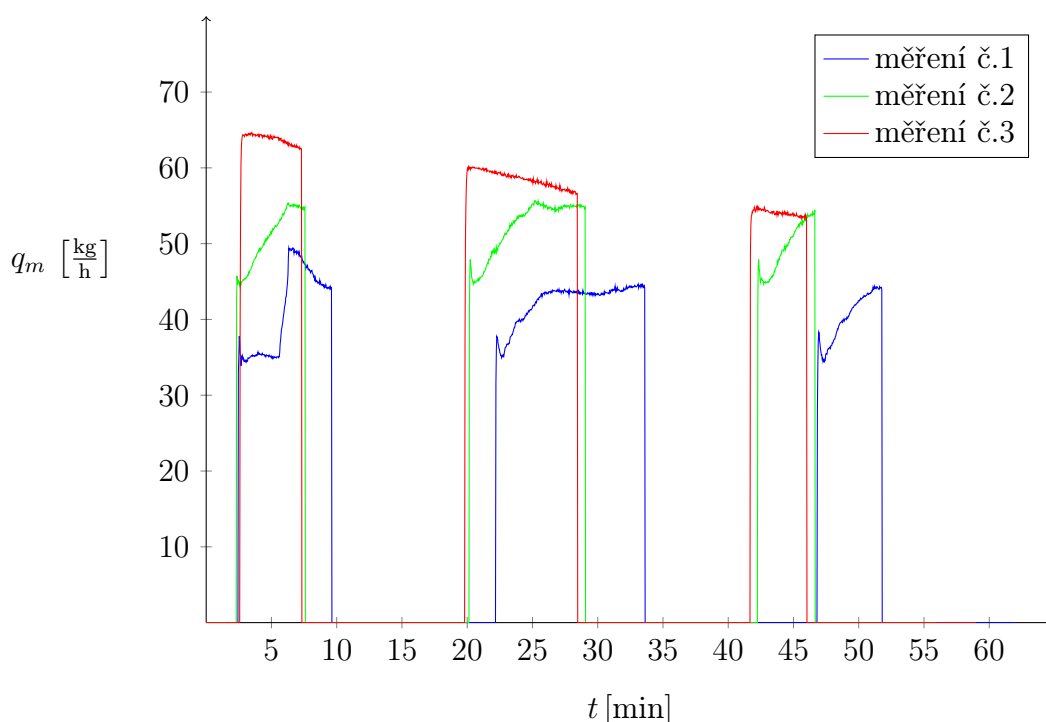
Obr. 4.6: Graf tlakové ztráty pro měřené prací cykly

Závěrem této kapitoly je nutné poznamenat, že celý soubor naměřených dat je v rozsahu desetitisíců řádků. Tento rozsah je způsoben vysokou frekvencí zápisu dat a způsobuje velkou časovou náročnost provedených výpočtů. S ohledem na rychlost měření jednotlivých snímačů se jeví vhodné vytvořit porovnání pro menší rychlost zápisu a posoudit vhodnou frekvenci. Data jsou proto přepočítána také pro zápis s periodou 0,5, 1 a 2 s. Tato změna se projeví pouze na hodnotě kumulovaného průtoku páry, jak bude ukázáno v následující kapitole.



## 5. Diskuze výsledků

Na základě offline výpočtu průtoku a jeho nejistoty lze shrnout dosavadní výsledky. V případě výpočtu hmotnostního průtoku zobrazeného na obrázku 5.1 je vhodné připomenout poznámku z konce předchozí kapitoly. Použitá měřidla mají danou rychlost zápisu (snímač diferenčního tlaku  $3,5 \text{ měření} \cdot \text{s}^{-1}$ , snímač statického tlaku  $4 \text{ měření} \cdot \text{s}^{-1}$ , snímač teploty tuto rychlost neuvádí) a pro relevantní výsledky tak vyvstává otázka, zda je rychlost zápisu dat  $0,1 \text{ s}$  vhodná. Při takto vysoké rychlosti jsou data ze snímačů duplikována, navíc se jedná o obrovské množství dat, což při dlouhodobějším kontinuálním monitorování zapříčiňuje velké nároky na kapacitu paměti.



Obr. 5.1: Graf hmotnostního průtoku pro měřené prací cykly

Pro srovnání vlivu rychlosti zápisu na hodnotu kumulovaného průtoku a jeho nejistotu je uvedena tabulka 5.1. Rozdíly v hodnotách kumulovaných průtoku jsou přibližně  $0,2 \%$  z hodnoty spotřeby, což lze tolerovat. Postačující a vhodný se tak jeví zápis hodnot po  $1 \text{ s}$ .

V tabulce 5.1 jsou rovněž vypsány hodnoty nejistot. Nutno podotknout, že výsledné hodnoty nejistot jsou silně ovlivněny zjednodušením použitým při výpočtu průtoku, kdy byly minimální hodnoty hmotnostního průtoku mimo dobu odběru položeny rovno  $0$ . Tím se staly nulovými i nejistoty těchto průtoků. Toto zjednodušení rozhodně není správné, protože se ale nepodařilo eliminovat zdroj problému, zůstalo v platnosti.

Na výsledcích nejistot v době odběru lze pozorovat jistou podobnost. Blízkost výsledků obou postupů je znázorněna na obr. 5.2. Lze tak potvrdit, že podrobnější způsob výpočtu nejistoty je srovnatelný s nejistotou stanovenou podle doporučení normy ČSN EN ISO 5167. Normou užitá zjednodušení se zdají být dostačující. Nejistota počítaná způsobem 2 je vyšší, jelikož zahrnuje více vlivů. Tento fakt vyplývá i z obrázku 5.3, který zobrazuje nejistoty pro měření č. 2 a č. 3. Je však třeba poznamenat, že u výpočtu nejistoty

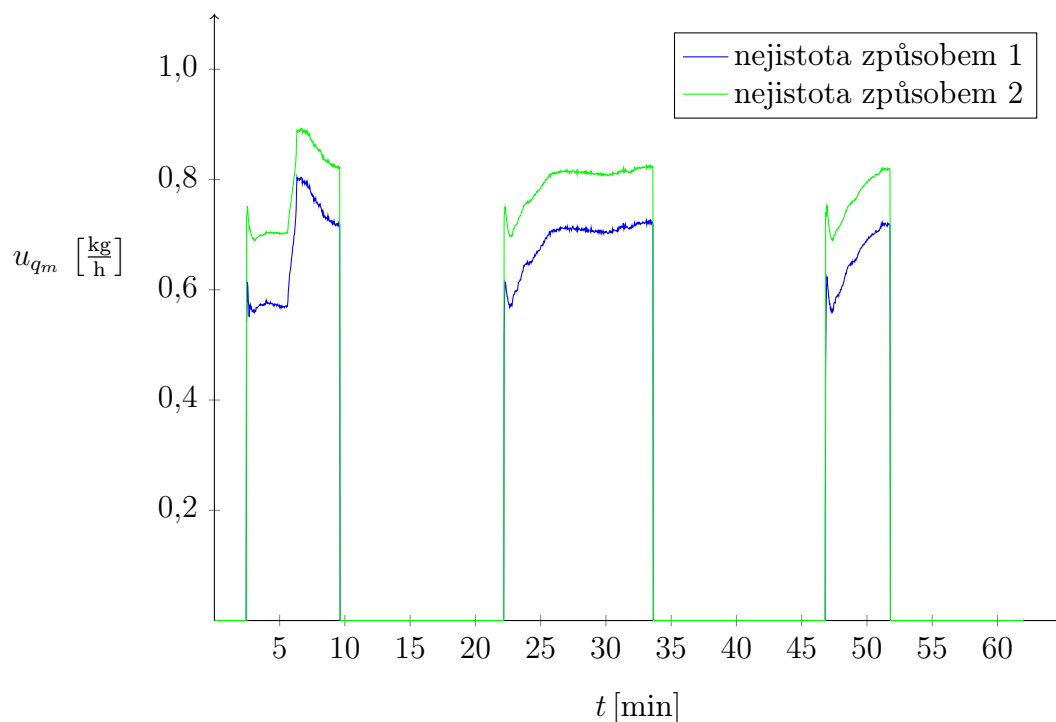
způsobem 1 je menší riziko vnesení chyby do použitých vztahů, než je tomu u způsobu 2. Z hlediska výpočtového času je navíc způsob 1 výrazně rychlejší.

Tab. 5.1: Výsledné hodnoty spotřeby, průtoku a příslušných nejistot

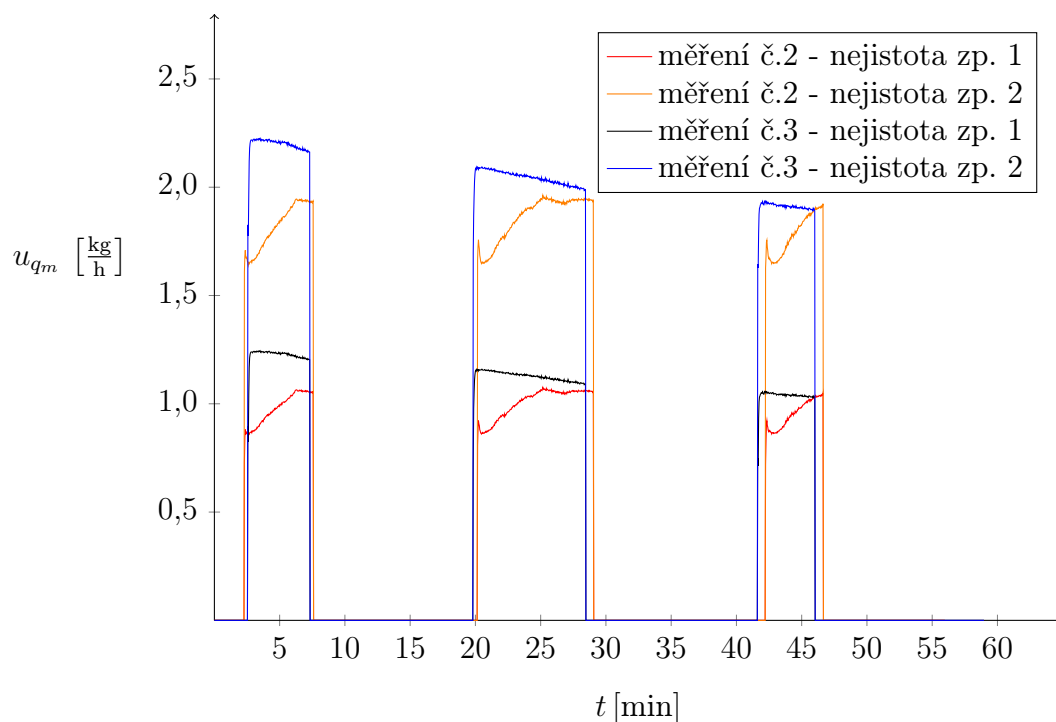
Měření č.1					
Perioda měření	[s]	0,1	0,5	1	2
$m$	[kg]	16,33	16,34	16,33	16,30
$U_1(m)$	[kg]	0,27	0,15	0,16	0,04
$U_2(m)$	[kg]	0,31	0,47	0,45	0,16
$\bar{q}_m$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	15,81	15,81	15,80	15,77
$U_1(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,26	0,14	0,16	0,04
$U_2(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,30	0,45	0,43	0,16
Měření č.2					
Perioda měření	[s]	0,1	0,5	1	2
$m$	[kg]	15,95	15,95	15,93	15,90
$U_1(m)$	[kg]	0,31	0,15	0,18	0,02
$U_2(m)$	[kg]	0,57	0,81	0,98	0,30
$\bar{q}_m$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	17,08	17,09	17,07	17,04
$U_1(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,33	0,16	0,20	0,03
$U_2(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,61	0,87	1,04	0,32
Měření č.3					
Perioda měření	[s]	0,1	0,5	1	2
$m$	[kg]	17,35	17,34	17,34	17,31
$U_1(m)$	[kg]	0,33	0,16	0,12	0,03
$U_2(m)$	[kg]	0,61	0,87	1,22	0,26
$\bar{q}_m$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	17,65	17,64	17,64	17,61
$U_1(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,34	0,16	0,13	0,03
$U_2(\bar{q}_m)$	[kg·h <sup>-1</sup> ]	0,62	0,88	1,24	0,27

Pro ověření správnosti výpočtu průtoku bylo rozhodnuto o porovnání spotřeby páry určené z hmotnostních průtoků s daty z původní clonové trati a s bilancí ohřevu vody během pracího cyklu. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.2. Lze si povšimnout poměrně velkého rozdílu mezi daty z původní clonové trati a daty z trati použité k experimentu. Bohužel i během měření, kdy nebyl odběr páry, ukazovala původní trať průtok v desítkách kilogramů v hodině. Stejně tak bilance pracího cyklu neposkytuje úplné potvrzení správnosti stanovené spotřeby páry. Jelikož bylo její určení velmi zjednodušeno, poskytuje pouze přibližný rozměr minimální spotřeby, protože nebyly uvažovány tepelné ztráty.

Z hodnot v tabulce si lze také všimnout rozdílu mezi spotřebami páry v prvním řádku. Podle klesající teploty napájecí vody se dá usuzovat, že k vytopení na požadovanou teplotu bylo postupně potřeba více tepla. Pára v jednotlivých měřeních měla různé hodnoty absolutního tlaku a tím i entalpii. Pro střední hodnotu absolutního tlaku v prvním cyklu



Obr. 5.2: Graf nejistoty hmotnostního průtoku měření č. 1



Obr. 5.3: Graf nejistoty hmotnostního průtoku měření č. 2 a 3

( $p = 0,39 \text{ MPa}$ ) připadá entalpie páry  $h = 2737,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , což pro danou spotřebu představuje energii přibližně 44,6 MJ. V případě 2. měření ( $p = 0,50 \text{ MPa}$ ) je entalpie páry  $h = 2748,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a dodaná tepelná energie 43,7 MJ. Pro třetí cyklus platí ( $p = 0,52 \text{ MPa}$ ),  $h = 2750,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a 47,6 MJ.

Tab. 5.2: Porovnání spotřeby páry podle různých výpočtů

		Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3
$m_{para,q_m}$	[kg]	16,3	16,0	17,4
$m_{para,PCT}$	[kg]	56,0	57,3	66,2
$m_{para,balance}$	[kg]	12,7	12,5	12,6

Z výsledků dále vyplývá, že pokud budou data o průtoku, resp. spotřebě páry v laboratoři nadále využívána, bude třeba se zamyslet nad úpravou stávající trati. U které, jak už bylo zmíněno v úvodu popisu experimentálního měření, jsou instalovány kondenzační nádoby. Přítomnost kondenzátu může narušovat měření tlakové difference. Stejně tak může mít vliv na správnost měření nepřilíš konstantní průtok páry. Ten je způsoben jednak nárazovým odběrem páry spotřebičem, ale také regulací průtoku motoricky řízeným ventilem. Ten při svém provozu způsobuje pulzaci průtoku, což je pro měření průtoku snímačem diferenčního tlaku zásadní problém.

# Závěr

Diplomová práce s názvem Nejistoty měření průtoku páry si kladla za cíl analyzovat problematiku nejistot měření na nepřímé úloze měření průtoku páry. Za tímto účelem byla nejprve zpracována úvodní teorie do problematiky chyb a nejistot měření. Kde byly na závěr uvedeny dva zjednodušené příklady. Jednalo se o přímou úlohu stanovení nejistoty měření průtoku pomocí rotametru a nepřímou úlohu zasahující spíše do laboratorní sféry, měření hustoty pomocí pyknometru.

V kapitole 2 bylo shrnuto základní rozdělení měřidel průtoku. Poté bylo blíže specifikováno měření průtoku normalizovanou clonou se zmíněním základních podmínek a výpočtových vztahů.

Dále bylo podle zadání provedeno experimentální měření průtoku páry. Popis přípravy měřicí sestavy a průběhu měření je popsán v kapitole 3. Celkem byly provedeny 3 měření. Zápis z měření je uveden v příloze A. V závěru kapitoly jsou uvedeny grafy naměřených hodnot tlaku, diferenčního tlaku a teploty páry, které slouží k výpočtu hmotnostního průtoku.

K výpočtu průtoku byl použit software využívající programovací jazyk Python 2.7. Výpočtový skript je pak hlavním výstupem této práce. Obsahuje výpočet aktuálního hmotnostního průtoku a kumulovaného průtoku. Dále zpracovává nejistotu průtoku podle normalizovaného postupu a zároveň přistupuje k výpočtu nejistot podrobnou analýzou zdrojů nejistot. Popis tohoto zpracování dat je uveden v kapitole 4 na niž navazuje kapitola 5 shrnující dosavadní výsledky.

Při vyhodnocení nejistoty průtoku se potvrdila náročnost celé problematiky. Bohužel došlo při výpočtu nejistot k chybě, kterou se nepodařilo odhalit, a tak byl výpočet omezen podmínkou nulového průtoku v časech, kdy nedocházelo k odběru páry. To ovlivnilo další výpočet kumulovaného průtoku i jeho nejistoty. Přesto bylo ale potvrzeno, že zjednodušený výpočet nejistoty průtoku podle příslušné normy je v praxi postačující. Zároveň bylo dokázáno, že stávající clonová trať v LENP neudává korektní hodnoty průtoku středotlakové páry.

# Literatura

- [1] BARABÁŠOVÁ, I. Prací proces a jeho nároky na energii a vodu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 26 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bobák, Ph.D.
- [2] ČSN EN ISO 5167-1, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky.
- [3] CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] VDOLEČEK, F.: Technická měření. Brno: Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu, 2002, online [cit. 3.2.2017] Dostupné z: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/ETC.pdf>
- [5] FIŠR, P. Analýza nejistot nepřímých měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2010.
- [6] ČSN ISO 5168, Měření průtoku tekutin - Postupy pro vyhodnocení nejistot.
- [7] VDOLEČEK, F. - PALENČÁR, R. - HALAJ, M.: Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. Automa, 7, 2001, č. 12, s. 28-33.
- [8] TŮMOVÁ, Olga. Metrologie a hodnocení procesů. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 231 s. : il. ; 23 cm. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [9] SLÁDEK, Z.- VDOLEČEK, F.: Technická měření. Skriptum VUT. Brno, Nakladatelství VUT Brno, 1992. 220s. ISBN 80-214-0414-0.
- [10] Snímače průtoku, sortiment FIEDLER AMS s.r.o., online [cit. 15.5.2017] Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/cs>
- [11] Snímače průtoku, sortiment HEINNLICH s.r.o., online [cit. 15.5.2017] Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/>
- [12] Snímače průtoku, sortiment JSP, s.r.o., online [cit. 15.5.2017] Dostupné z: <http://www.jsp.cz/cz/sortiment/>
- [13] Primární prvky pro měření průtoku v energetice a průmyslu, JSP, s.r.o., 17.2.2017, online [cit. 10.5.2017] Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/primarni-prvky-pro-mereni-prutoku-v-energetice-a-prumyslu/>
- [14] Snímače průtoku, sortiment Krohne CZ, spol. s r.o., online [cit. 15.5.2017] Dostupné z: <http://cz.krohne.com/cs/vyroby/>
- [15] ČSN EN ISO 5167-2, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony.
- [16] MILLER, R. W. Flow measurement engineering handbook. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c1996. ISBN 0-07-042366-0.

- [17] BOBÁK, P. Snižování energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 95 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [18] CMT-K, CMT-B Clonová měřicí trať s koutovými odběry. Objednací list. JSP, s.r.o. online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/rozsireny\\_sortiment/jsp/prutok/clonove-merici-trate-cmt.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/rozsireny_sortiment/jsp/prutok/clonove-merici-trate-cmt.html)
- [19] Snímač diferenčního tlaku pro technologické procesy s komunikací HART®. Katalogový list. BD SENSORS s.r.o. online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.bdsensors.cz/tlak/diferencni-snimace-tlaku/detail/produkt/xmd/>
- [20] D2610 Přesné inteligentní miniaturní snímače tlaku s komunikací LHP. Informační list. JSP, s.r.o. online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorie/snimace\\_tlaku\\_a\\_tlakove\\_diference/snimace\\_tlaku\\_a\\_tlakove\\_diference\\_s\\_analogovym\\_vystupem/inteligentni-miniaturni-snimac-tlaku-d2610-skomunikaci-lhp.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/snimace_tlaku_a_tlakove_diference_s_analogovym_vystupem/inteligentni-miniaturni-snimac-tlaku-d2610-skomunikaci-lhp.html)
- [21] ModuTEMP®70 Modulární odporové a termoelektrické snímače teploty bez převodníku a s převodníkem. Informační list. JSP, s.r.o. online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorie/snimace\\_teploty/termoelektricke\\_snimace\\_teploty/odporove-snimace-teploty-t1005-jimkou-bez-prevodniku-prevodnikem.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_teploty/termoelektricke_snimace_teploty/odporove-snimace-teploty-t1005-jimkou-bez-prevodniku-prevodnikem.html)
- [22] P235GH - nelegovaná žáruvzdorná ocel pro tlakové nádoby a bezešvé trubky, Ripra, s.r.o. online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: <http://www.pdms.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/>
- [23] PERRY, Robert H. a Don W GREEN. Perry's chemical engineers' handbook. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-142294-9.
- [24] Python implementation of standards from The International Association for the Properties of Water and Steam. Python Software Foundation. Online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: <https://pypi.python.org/pypi/iapws>
- [25] Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, IAPWS, Dresden 2016, online [cit. 10.3.2017] Dostupné z: <http://www.iapws.org/>
- [26] Snímače teploty pro průmysl. Informační list. A.W.V. Elektro online [cit. 3.5.2017] Dostupné z: [http://www.awv.cz/kat-greisinger/13\\_snimace\\_teploty.pdf](http://www.awv.cz/kat-greisinger/13_snimace_teploty.pdf)





# Seznam použitých symbolů a zkratek

## Symbole veličin

$A$	člen výpočtového vztahu součinitele průtoku	$[-]$
$A_1, A_2$	průřez potrubí, průřez otvoru clony	$[m^2]$
$A(i)$	citlivostní koeficient $i$ -tého zdroje	$[j]$
$\bar{c}_p$	měrná tepelná kapacita	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$C$	součinitel průtoku	$[-]$
$d$	průměr otvoru clony	$[m]$
$D$	vnitřní průměr potrubí	$[m]$
$e$	náhodná chyba měření	$[j]$
$h$	krok pro výpočet numerické derivace	$[j]$
$h_{para}$	entalpie páry	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$k$	koeficient rozdělení	$[-]$
$k_r$	koeficient rozšíření	$[-]$
$l_1, l_2$	vzdálenosti tlakového odběru od stěny clonového kotouče	$[m]$
$L_1, L_2$	podíly vzdáleností tlakového odběru od stěny clonového kotouče a vnitřního průměru potrubí	$[-]$
$m$	hmotnost, spotřeba	$[kg]$
$M_2'$	člen výpočtového vztahu součinitele průtoku	$[-]$
$n$	počet (měření)	$[-]$
$p$	absolutní tlak	$[MPa]$
$p_1$	absolutní tlak před clonou	$[MPa]$
$p_2$	absolutní tlak za clonou	$[MPa]$
$q_m$	hmotnostní průtok	$[kg \cdot s^{-1}]$
$q_v$	objemový průtok	$[l \cdot h^{-1}]$
$\bar{q}_v$	objemový průtok	$[l \cdot h^{-1}]$
$r$	korelační koeficient	$[-]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[-]$
$s$	směrodatná odchylka	$[j]$
$s_{\bar{x}}$	směrodatná odchylka aritmetického průměru	$[j]$
$t$	čas	$[s]$
$T$	teplota	$[^{\circ}C]$
$x_m$	výsledek měření	$[j]$
$x_s$	skutečná hodnota	$[j]$
$\bar{x}$	průměrná hodnota	$[j]$
$x, y, z$	odhady veličin	$[j]$
$X, Y, Z$	veličiny	$[j]$

$u_A$	standartní nejistota typu A	[j]
$u_B$	standartní nejistota typu B	[j]
$u_C$	kombinovaná standartní nejistota	[j]
$u(x_i, x_j)$	kovariance	[j]
$U$	rozšířená nejistota	[j]
$w$	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
$z_{max}$	maximální odchylkazdroje nejistoty	[j]
$\alpha$	součinitel délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\beta$	poměr průměrů	[-]
$\Delta p$	diferenční tlak	[Pa]
$\Delta t$	perioda zápisu měření	[s]
$\Delta_x$	absolutní chyba	[j]
$\Delta\tilde{\omega}$	tlaková ztráta	[Pa]
$\epsilon$	systematická chyba měření	[j]
$\epsilon$	součinitel expanze	[-]
$\kappa$	izoentropický exponent	[-]
$\mu$	dynamická viskozita	[Pa·s]
$\rho$	hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]

## Dolní indexy

0	počáteční hodnota
1, 2	způsob výpočtu nejistoty
<i>balance</i>	balance
<i>c</i>	clona
<i>C</i>	součinitel průtoku
<i>d</i>	průměr otvoru clony
<i>D</i>	vnitřní průměr potrubí
<i>i</i>	číslo veličiny
<i>j</i>	číslo veličiny
<i>m</i>	hmotnostní
<i>p</i>	potrubí
<i>para</i>	para
<i>PCT</i>	původní clonová trať
<i>q<sub>m</sub></i>	hmotnostní průtok
<i>T</i>	teplota

$v$	objemový
$voda$	voda
$vzduch$	vzduch
$vzorek$	vzorek
$\alpha$	součinitel délkové roztažnosti
$\beta$	poměr průměrů
$\Delta p$	diferenční tlak
$\epsilon$	součinitel expanze
$\kappa$	izoentropický exponent
$\mu$	dynamická viskozita
$\rho$	hustota

## Zkratky

LENP	Laboratoř energeticky náročných procesů
NETME	New Technologies for Mechanical Engineering (Nové technologie pro strojírenství)
NTL	nízkotlaká (pára)
P&I	Piping and instrumentation diagram (Schéma potrubí a měřidel)
STL	středotlaká (pára)



# Seznam příloh

Příloha A - Protokol z experimentálního měření

Příloha B - Názorný výpočet průtoku a jeho nejistoty